

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra mechanické technologie**

**Studium vlivu drsnosti povrchu substrátu na  
vlastnosti termického nástřiku**

**Study of Influence Roughness Surface Substrate on  
Charecteristics of Thermic Spray**

**Student:**

**Bc. Lukáš Řihák**

**Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.**

**Ostrava 2012**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Řihák**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: Studium vlivu drsnosti povrchu substrátu na vlastnosti termického  
náštříku  
Study of Influence Roughness Surface Substrate on Characteristics of  
Thermic Spray

### Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte charakteristiku povrchu ocelového substrátu.
2. Prostudujte vlastnosti a technologii aplikace termického náštříku.
3. Prostudujte vliv reliéfu substrátu na adhezi termického náštříku.
4. Navrhněte metodiku experimentálních prací.
5. Zpracujte technickou zprávu.

### Seznam doporučené odborné literatury:

MOHYLA, M.: *Technologie povrchových úprav kovů*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 2006. 3. vydání. 156 s. ISBN 80-248-1217-7.  
PODJUKLOVÁ, J.: *Speciální technologie povrchových úprav I*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 1994. 1. vydání. 71 s. ISBN 80-7078-235-8.  
BURAKOWSKI, T., WIERZCHOŃ, T.: *Surface Engineering of Materials*. CRC Press LLC, 1999. 592 s. ISBN 0-8493-8225-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



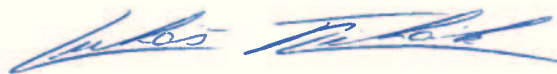
  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 18.5.2012

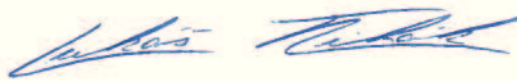


.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2012



Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Lukáš Řihák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Werichova 25, Olomouc 799 00

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Řihák, L. *Studium vlivu drsnosti povrchu substrátu na vlastnosti termického nástřiku: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 57 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Diplomová práce se zabývá závislostí přilnavosti termického nástřiku na drsnosti substrátu. V úvodu je popsána celková problematika termických nástřiků, stávající technologie používané pro nanášení povlaků a možnosti aplikace nástřiků v různých odvětvích průmyslu. Na základě doporučené literatury, zkušeností a dostupných technologií je vybrána metoda přípravy povrchu substrátu a metoda pro ověřování přilnavosti TBC (thermal barrier coating), nástřiku. Vyhodnocení vzorků je prováděno v laboratořích na trhačím stroji. Na základě výsledků je provedena závislost přilnavosti nástřiku na drsnosti substrátu a určeno, která drsnost je pro termický nástřik nejvhodnější.

## ANNOTATION OF GRADUATION THESIS

Řihák, L. *Study of the effect of surface roughness of the substrate on the properties of thermal spraying: Graduation thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2010, 57 p. Thesis head: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc..

This thesis deals with the dependence of the adhesion thermal coating and substrate roughness. The introduction describes the general problem of thermal spray, the current technology used for the coating and the possibility of spray applications in various industries. Based on the recommended reading, experience and available technology is selected substrate surface preparation method and the method for verifying of adhesion thermal barrier coating. Evaluation of samples is carried out in laboratories on the tensile machine. Based on the results is made dependent on the roughness of coating adhesion substrate and determined that roughness is most suitable for thermal spraying.

## OBSAH

0	ÚVOD .....	9
1	PRINCIP TECHNOLOGIE TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ .....	10
1.1	Jakost povrchu .....	11
1.2	Příprava povrchu .....	12
1.2.1	Chemické úpravy povrchu .....	13
1.2.2	Mechanické úpravy povrchu .....	15
1.3	Procesní parametry nástřiku .....	17
1.3.1	Oxidické vměstky .....	18
1.3.2	Porezita povlaku .....	18
1.4	Konečné opracování nástřiku na požadované rozměry .....	20
1.4.1	Třískové obrábění .....	20
1.4.2	Broušení .....	20
2	METODY TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ .....	20
2.1	Nástřik plamenem .....	20
2.2	Detonační nástřik .....	22
2.3	Vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF .....	22
2.4	Plazmatický nástřik .....	23
2.5	Nástřik elektrickým obloukem .....	25
3	VYUŽITÍ TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ V PRAXI .....	26
3.1	TBC nástřiky v leteckém průmyslu .....	30
4	HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ POVLAKŮ .....	33
4.1	Stanovení přilnavosti v tahu .....	33
4.2	Hodnocení struktury vzorku .....	34
5	POPIS METODIKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ .....	35
6	METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ .....	36
6.1	Materiál použitý pro experimentální práce .....	36
6.2	Příprava povrchu .....	37
6.3	Aplikace povlaku nástřikem .....	39
7	METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ .....	42
7.1	Měření drsnosti povrchu .....	42
7.2	Zkouška adheze na trhacím stroji .....	44
7.3	Zkouška mikrotvrdosti povlaku .....	50
7.4	Vyhodnocení struktury povlaku .....	51
8	ZÁVĚR .....	54
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	55
10	SEZNAM PŘÍLOH .....	57

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Combustor	Část spalovací komory proudového motoru
HVOF	High velocity oxy-fuel coating spraying (Vysokorychlostní nástřik plamenem)
APS	Air plasma spraying (nástřik v prostém prostředí)
VPS	Vakuum plasma spraying (nástřik v uzavřené atmosféře)
RFPS	Radio-frekuensi plasma spraying (radiofrekvenční nástřik)
TWAS	Twin wire arc spraying (twin wire nástřik)
D-Gun	Detonation spraying (detonační nástřik)
CH <sub>4</sub>	Methan
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Propylen
H <sub>2</sub>	Vodík
O <sub>2</sub>	Kyslík
Ar	Argon
He	Helium
N <sub>2</sub>	Dusík
C	Kobalt
Mn	Mangan
Si	Křemík
Cr	Chrom
Ni	Nikl
W	Wolfram
La	Lathanum
B	Bór
Fe	Železo
Co	Kobalt
BC	Bont Coat (mezivrstva mezi keramikou a základním materiálem)
TBC	Thermal barrier coating (ochranný tepelný povlak)
ASM	American Society for Metals (americká společnost pro materiály)
ASTM	American Society for Testing and Materials (americká norma pro zkoušení materiálu)

m/s	Jednotka rychlosti
μm	Jednotka délky
mm	Jednotka délky
HV	Symbol tvrdosti dle Vickerse
N	Jednotka síly
°C	Jednotka teploty
K	Jednotka teploty (273,15 + °C)



## 0 ÚVOD

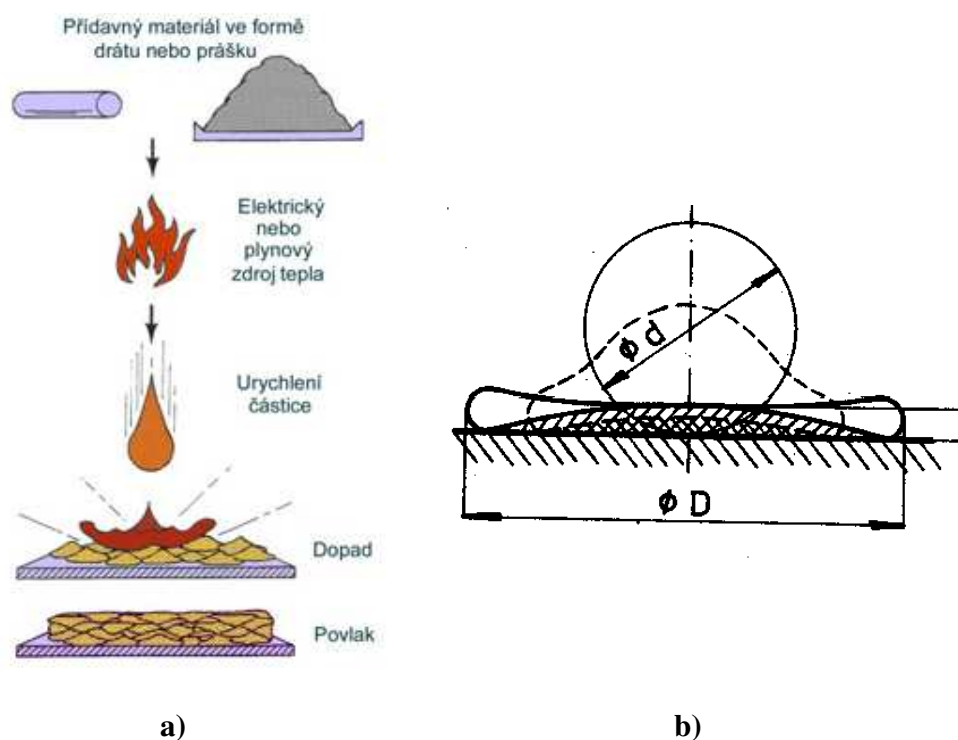
Výroba a opravy dílců leteckých motorů je odvětví, ve kterém se spojují vyspělé technologie, nekonvenční materiály, kvalita a přesnost výroby. Technologie termických nástřiků patří mezi jednu z vyspělých technologií, které jsou v odvětví leteckého průmyslu používány, pro zvýšení kvality povrchových vlastností součástí. Keramické nástřiky mají oproti kovovým lepší vlastnosti např. vysokou tvrdost, nízkou elektrickou a tepelnou vodivost. Právě nízké teplené vodivosti těchto materiálů se využívá u tzv. tepelných bariér (Thermal Barrier Coating dále jen TBC), které jsou aplikovány u součástí, umístěných ve spalovací komoře proudových leteckých motorů a tak slouží jako ochrana před vysokými teplotami.

Základní funkcí těchto tepelných bariér je zabránit přestupu tepla do základního materiálu součásti a také spolu s kovovou mezivrstvou působí i jako ochrana proti korozi za vysokých teplot. Základní materiál (superslitiny na bázi niklu) s povlakem TBC může být vystaven podstatně vyšším pracovním teplotám, které jsou žádoucí z důvodů celkového nárůstu účinnosti motoru.

Cílem této diplomové práce bylo zjistit závislost drsnosti substrátu na přilnavosti naneseného keramického nástřiku. Zodpovědnost, která je kladena na firmy v odvětví leteckého průmyslu je nemalá s ohledem na bezpečnost v leteckém provozu, a proto je přilnavost tohoto nástřiku velice důležitá, jelikož porušení tepelné bariéry může vést k propálení základního materiálu podsestavy a následnému porušení celého motoru. Tepelná bariéra je aplikována na materiál Hayness 188, který je používán pro výrobu podsestav spalovací komory leteckého motoru. Nástřik je aplikován metodou plazmovým plamenem air plasma spraying.

# 1 PRINCIP TECHNOLOGIE TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ

Termický nástřik je proces, vytváření povlaků pomocí prášků popřípadě drátů. Prášek je přiváděn do zařízení, kde dojde k jeho natavení a urychlení částic směrem k substrátu. Při dopadu na substrát dojde k plastické deformaci částice a jejímu tuhnutí. Tato deformovaná částice, která se nazývá „splat“, je základní stavební jednotkou povlaku. Vlastní nástřik je poté vytvářen postupným nanášením částic ve vrstvách. Vlastnosti povrchu jsou dány nejen formováním a vazbou částic a podložky, ale také vazbou jednotlivých částic mezi sebou.



**Obr. 1** a) Princip žárového nástřiku a následná deformace při dopadu částic [12],  
b) „Splat“ [2]

Zdrojem tepelné energie, která je nutná k natavení přídavného materiálu, může být elektrická energie nebo spalovací proces. Podle použitého zařízení tedy nástřiky dále rozdělujeme na:

a) Spalování

- Nástřik plamenem
- Detonační nástřik – D-Gun
- Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF

b) Elektrická energie

- Plazmatický nástřik
  - APS – air plasma spraying
  - VPS – vakuum plasma spraying
  - RFPS – radio-frequency plasma spraying
- Nástřik elektrickým obloukem
  - TWAS – twin wire arc spraying

Pro všechny požadované vlastnosti nástřiku je nutné při aplikaci dodržet určitý postup a zásady, ovlivňující kvalitu a také provozuschopnost daného nástřiku. Mezi tyto důležité zásady patří:

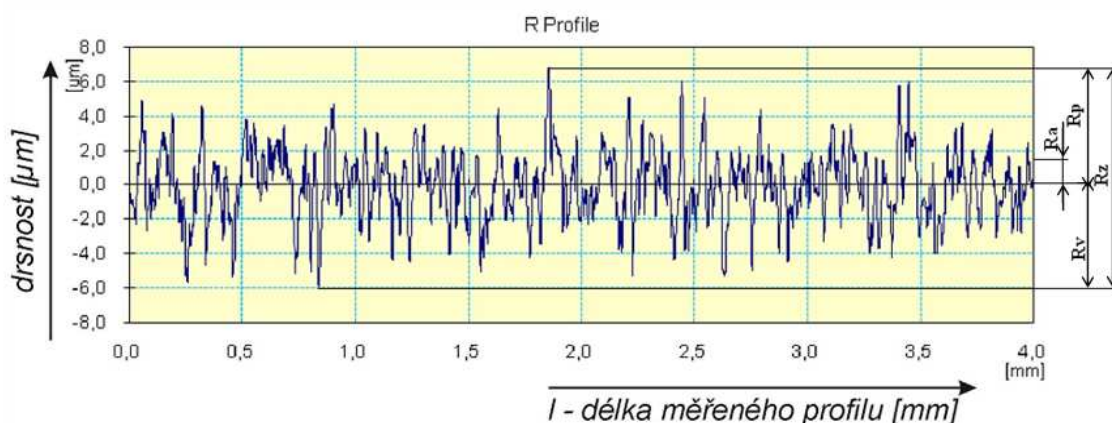
- Příprava povrchu základního materiálu pro nástřik
- Procesní parametry nástřiku
- Konečné opracování nástřiku na požadované rozměry

## 1.1 Jakost povrchu

Drsnost povrchu je pro strojní součást stejně důležitá jako přesnost rozměru. Jakost povrchu se volí s ohledem na funkční vlastnosti. Součásti rozlišujeme na dva základní typy funkčních

ploch a to jsou plochy stykové, u kterých dochází ke vzájemnému styku dvou součástí a kde tato jakost povrchu ovlivňuje funkci celku a na plochy volné, u kterých nedochází k dalšímu styku se součásti, například vnější povrch součástí. Hodnocení kvality povrchu se provádí kvantitativní, prováděném pomocí pozorovacího zařízení, nebo kvalitativní metodou což je porovnávání pomocí hmatu či zraku s povrchem vzorku, který je opracován na stejném typu stroje. Jakost povrchu se obvykle hodnotí podle drsnosti povrchu. Drsnost je definována střední aritmetickou úchylkou profilu  $R_a$ .

Drsnost povrchu charakterizují jednotlivé parametry drsnosti:



**Obr. 2** Základní parametry popisující drsnost

- **$R_a$**  – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [ $\mu\text{m}$ ]
- **$R_z$**  – největší výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]
- **$R_v$**  – největší hloubka prohlubně profilu [ $\mu\text{m}$ ]
- **$R_p$**  – největší výška výstupku profilu [ $\mu\text{m}$ ]
- **$l$**  – délka naměřeného profilu [mm]

## 1.2 Příprava povrchu

Kvalitně připravený povrch má velký vliv na spojení dopadajících částic přídavného materiálu k substrátu a celkové přilnavosti nástřiku při namáhání.

Proto je před aplikací nástřiku na substrát nutné připravit povrch tak, aby měl povrch substrátu optimální podmínky pro povlak. Pro vznik pevného spojení mezi povlakem a substrátem je nutné odstranit vlhkost, veškeré mastnoty s předchozího obrábění, oxidační vrstvy a připravit povrch vytvořením co nejpríznivější drsnosti povrchu substrátu.

Mechanické nečistoty odstraňujeme odmaštěním, chemicky vázané mořením nebo mechanickými úpravami jako je otryskávání nebo broušení. Při velkých požadavcích se provádí ještě chemické nebo mechanické leštění.

### **1.2.1 Chemické úpravy povrchu**

Jsou to takové úpravy, při kterých reagují chemická činidla s nečistotami na povrchu materiálu. Obvykle se takto připravuje povrch pro různé povlaky. Mezi základní chemické úpravy patří:

#### ***1.2.1.1 Odmašťování v organických rozpouštědlech***

Mastnota povrchu dílce, která vzniká v provozu nebo při obrábění součástí, zabraňuje dobré přilnavosti nástřiku k substrátu, proto je důležité mít povrch, na kterém bude nástřik aplikován dokonale odmaštěn. K odmašťování dílců před nástřikem se používá chemické odmaštění v rozpouštědlech např. trichloretylen, metanol, atd. Rozpouštědla se doporučují taková, která neobsahují žádné procento mastnoty popřípadě velmi malé množství. Nemělo by zanechávat žádné stopy na dílci, které by následně mohlo způsobit snížení přilnavosti nástřiku.

Při práci s rozpouštědly a odmašťovacími linkami je potřeba dbát zvýšené pozornosti na bezpečnost a hygienu práce a znát práci s jedy a žiravinami.

#### ***1.2.1.2 Alkalické odmašťování***

Alkalické odmašťování se provádí ve třech fázích. První je odmašťování, při kterém se používají prostředky obsahující louh nebo sodu. Teplota roztoku při ponorném odmašťování je 60°- 72°C. Doba odmaštění je úměrná znečištění provádí se zhruba 10-30min.

Následuje opláchnutí v destilované vodě při teplotě 15-70°C po dobu 10-30 min. Poslední fází je sušení, které se provádí při teplotách 70-90°C opět stejnou dobu jako předchozí fáze.

Pro nástřik není toto odmašťování tak vhodné jako v organických rozpouštědlech jelikož toto odmaštění nedokáže dostatečně smýt penetrant používaný u fluorescenční kontroly. [5]



**Obr. 2** Proces alkalického odmašťování

#### ***1.2.1.3 Elektrolytické odmašťování***

Docílí se nejlepšího odmaštění, lze ním odstranit i pevně lnoucí nečistoty. Používá se při choulostivých povrchových úpravách. Principem je, že čištěný předmět se zapojí v alkalickém roztoku jako katoda a použije se co největšího stejnosměrného proudu. Vlivem elektrolýzy se vytvoří silně alkalická zóna a nastane silný vývoj vodíku. Vyvíjecí se vodík je silně reaktivní a redukuje tenké vrstvy oxidů a zároveň dochází k odtrhávání filmů ulpělých na povrchu. Důležitým faktorem pro tuto technologii je vodivost lázně, kterou zajišťuje její složení a změna koncentrace v oblasti elektrody. Na katodě se vytváří bublinky vodíku, na anodě bublinky kyslíku. [1]

#### ***1.2.1.4 Moření***

Mořením se odstraňují oxidické nečistoty z povrchu jako jsou rez a okuje chemickým způsobem. Působením kyseliny nebo louhů se oxidy převedou na rozpustné soli, které

se z povrchu opláchnou vodou. Nejčastěji se moření provádí v kyselinách (kyselina sírová, sodná). Dalšími způsoby moření je moření v parách chlorovodíku, v taveninách.

#### ***1.2.1.5 Čištění opalováním***

Čištění opalováním je vhodné pro využití odstranění zplodin. Provádí se ohřátím na teplotu 300 - 700°C, při které dochází ke spálení mastnot za tvorby plyných produktů, např. oxidu uhličitého, tvorby vrstvy uhlíku a oxidické vrstvy. [1]

### **1.2.2 Mechanické úpravy povrchu**

Tyto úpravy provádíme, za účelem čištění povrchu materiálu od okují, vytvoření podmínek pro nanesení a dobré zakotvení povlaku, vzhledové požadavky. Tyto úpravy lze rozdělit:

#### ***1.2.2.1 Omílání***

Vhodné zejména pro úpravy povrchu malých předmětů. Vzájemným odíráním předmětů v bubnu nebo zvonu. Tato metoda slouží k odjehlování, odstranění zbytku tavidel po svařování odstranění zbytku koroze. Používají se kameny umělého korundu popřípadě křemen, žula.

#### ***1.2.2.2 Broušení***

Vhodné před vytvářením povlaku jako příprava povrchu, nebo jako konečná úprava povrchu. Podle požadavků se používají brusné kotouče, papírové pásy, leštící pasty.

#### ***1.2.2.3 Kartáčování***

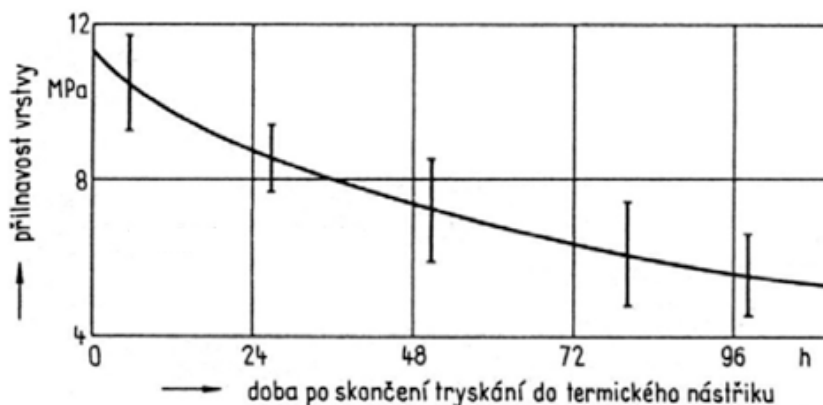
Jedná se o ruční práci, při které záleží na tlaku na součást. Pro hrubé nečistoty se používají kartáče s ocelovými dráty, pro zjemnění povrchu se používají kartáče s umělými vlákny.

#### 1.2.2.4 Otryskávání

Tryskání povrchu různými tryskacími médii se používá jako příprava povrchu pro další zpracování nebo také jako čištění dílců, které jsou znečištěny provozem. Tryskací média jsou vysoce abrazivní materiály na kovové i nekovové bázi, které jsou vrhány velkou rychlostí proti povrchu součásti. Mezi nejčastěji používané patří korund, karbid křemíku, křemenný písek, balotina.

Podle druhu použitého média, jeho zrnitosti a velikosti tlaku použitého při tryskání lze ovlivnit celkovou drsnost připraveného substrátu pro nástřik. Otryskanou součást je potřeba ofouknout stlačeným vzduchem, aby na povrchu nezůstávali zbytky tryskacího média, a při následné manipulaci je doporučováno vyhýbat se dotyku holou rukou, aby nedošlo k znečištění připraveného povrchu.

Tryskáním se přivede povrch substrátu do stavu termodynamické nerovnováhy s okolním prostředím. Povrch podložky se chemicky aktivuje v důsledku uvolnění meziatomových vazeb povrchových atomů. V důsledku chemické absorpce plynů z atmosféry a oxidace se tato chemická aktivita povrchu rychle snižuje, což má vliv na snížení přilnavosti povlaku. Prodleva mezi tryskáním a žárovým nástřikem nám silně ovlivňuje přilnavost nástřiku a neměla by být delší než 24 hodin. [2]



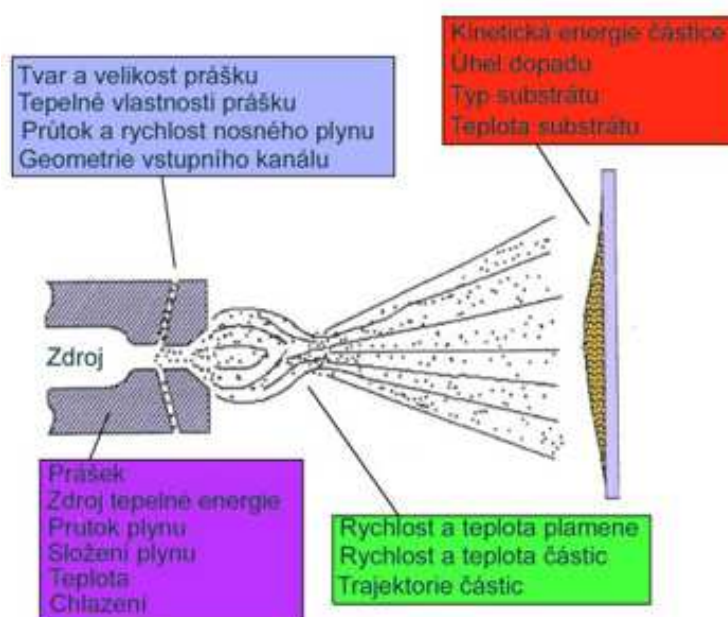
**Obr. 3** Závislost doby prodlevy mezi tryskáním a žárovým nástřikem na přilnavosti povlaku [2]

Kromě tryskacího média jsou při tryskání důležité další parametry jako je vzdálenost tryskání, úhel tryskání, tlak, pod kterým tryskání provádíme.



### 1.3 Procesní parametry nástřiku

Parametry mající největší vliv na kvalitu povlaku jsou např. tvar a velikost prášku, zdroj tepelné energie a jeho výkon, typ a geometrie hubic, úhel dopadu a další. Mezi nejdůležitější faktory, určující zda je k dispozici dostatek energie a času k natavení přídavného materiálu, patří teplota a rychlost plamene.



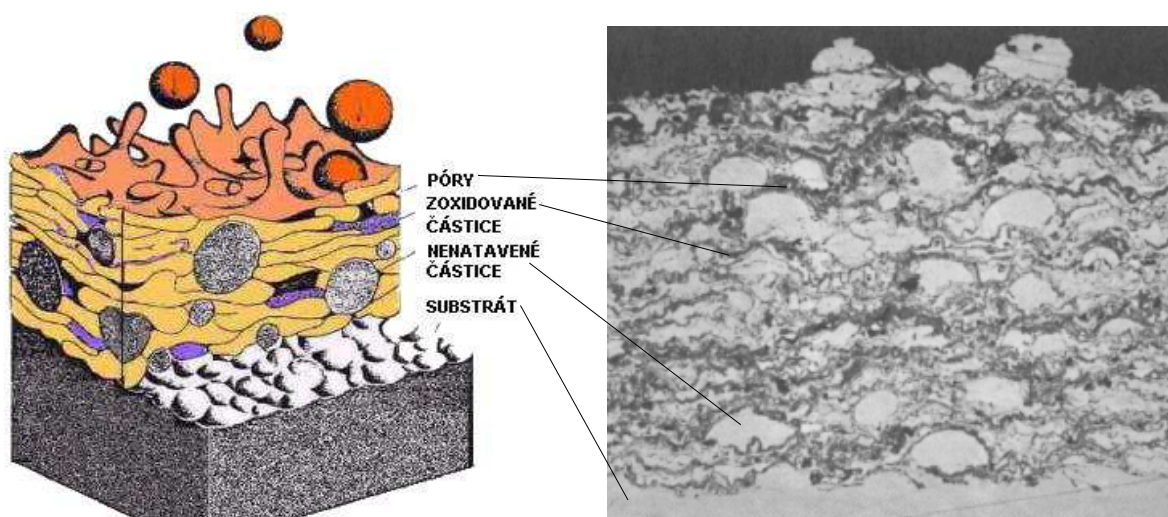
**Obr. 4** Hlavní parametry procesu [12]

U plazmatického nástřiku je důležitým parametrem doba, kterou letící částice přídavného materiálu setrvá v plameni o teplotě vyšší, než je teplota tavení. Vyšší rychlost plamene má za následek vyšší rychlost letících částic a větší kinetickou energii při dopadu na substrát. To vede k jejímu lepšímu zakotvení částice k povrchu substrátu a vyšší hustotě povlaku díky zvýšené plastické deformaci dopadající částice.

Vyšší rychlost plamene má však i své protiklady jelikož dochází k nižšímu natavení částice, vyskytuje se v nástřiku více nenatavených nebo jen částečně natavených částic ve struktuře povlaku a tím vzniká vyšší míra oxidace v nástřiku.

### 1.3.1 Oxidické vměštky

Oxidace v kovových povlacích jsou na struktuře příčného řezu rozpoznatelné jako dlouhé, tmavé útvary. Vznikají interakcí letící částice s okolní atmosférou, nebo jak již bylo zmíněno na povrchu povlaku vlivem vysoké teploty. Na oxidaci vzniklou v průběhu letu má vliv teplota částice a doba letu. Po dopadu na substrát je zoxidovaná částice deformována stejně jako ostatní dopadající částice. Zvýšená koncentrace oxidů na jednom místě může vést ke snížení kohezní pevnosti povlaku.



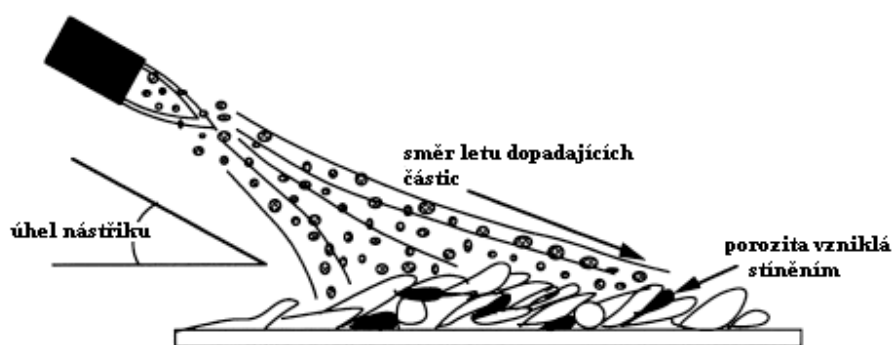
**Obr. 5** Zobrazení nenatavených a zoxidovaných částic v nástřiku [12], [3]

### 1.3.2 Porezita povlaku

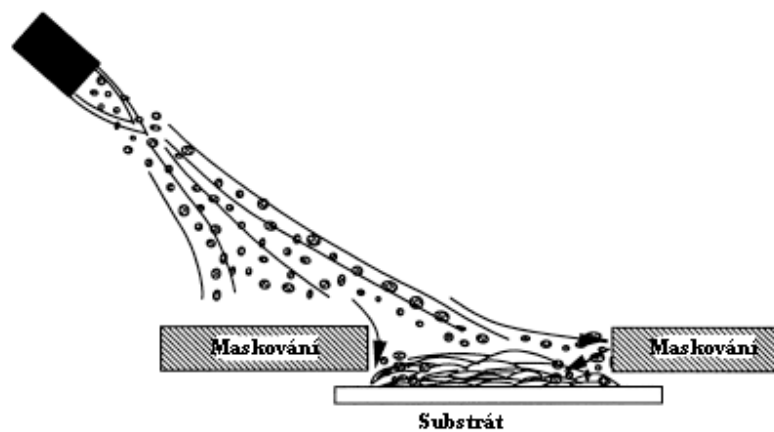
Vysoký počet nenatavených nebo jen částečně natavených částic má za následek zvýšenou porezitu nástřiku a následné praskání a odštipování povlaku. Přítomnost pórů ve struktuře má za následek snižování tvrdosti a zhoršení kvality povrchu povlaku. Povrch, na kterém je aplikován nástřik se v převážné většině obrábí na požadovaný rozměr a drsnost. Toto nám vysoká porezita neumožní. Porezita může vznikat nejen nenatavením částic, ale také

nízkou vzájemnou kohezí splatů, smršťování splatů během tuhnutí, nástřikem pod velkým úhlem nebo stíněním a odražením částic od přilehlých ploch.

Aby se eliminovala vlivem nástřiku pod ostrým úhlem, je doporučováno udržovat úhel nástřiku větší než  $30^\circ$ . Eliminovat ji lze také použitím vhodného krytování.



**Obr. 6** Porezita vzniklá nástřikem pod velkým úhlem [3]



**Obr. 7** Porezita vzniklá při využití krytování [3]

## **1.4 Konečné opracování nástřiku na požadované rozměry**

### **1.4.1 Třískové obrábění**

Vhledem na snížení přilnavosti a pevnosti v porovnání se standardními materiály, vyžaduje třískové obrábění jiné řezné podmínky. Proto můžou plazmou stříkané plochy přenášet jen malé tlakové zatížení, typické pro třískové obrábění. Tyto zatížení zvedají částčky vrstvy a způsobují jejich odlupování a znehodnocení. Vzhledem k velké tvrdosti nástřiku a přítomnost oxidů se pro obrábění používají řezné nástroje s plátky ze slinutých karbidů, při doporučené řezné rychlosti v rozsahu 10-15m/min, posuvem maximálně 0,3 mm/ot. [2]

### **1.4.2 Broušení**

Řezné podmínky broušení je potřeba volit tak, aby nedocházelo k vytrhávání částic nástřiku. Správnému broušení plazmou stříkaných vrstev pomáhá impregnace povrchu voskem před broušením. Mezi parametry ovlivňující broušení nástřiku patří vhodná volba brusného kotouče ty se s ohledem na tvrdost povlaku doporučují s diamantovým brusivem, karbidem křemíku, nebo s brusivem kubického nitridu bóru. Není vhodné používat korundové brusné kotouče, jelikož jejich použití znehodnocuje povrch broušené plochy. Další důležité parametry jsou řezná rychlost, posuv a dostatečný odvod tepla. [2]

## **2 METODY TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ**

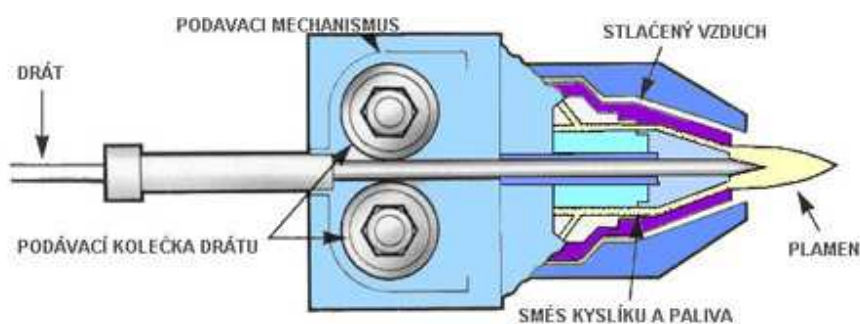
### **2.1 Nástřik plamenem**

Nástřik plamenem je nejstarším způsobem žárového nástřiku. Tato metoda používá stlačený vzduch nebo kyslík společně s palivem např. propan, vodík, acetylen. Nanášený materiál ve formě prášku nebo drátu je přiváděn do plamene, vzniklého hořením této směsi, kde dojde k jeho natavení a urychlení směrem k povlakové součásti. Obecně tento proces vytváří povlaky o nižší kvalitě, které nejsou využívány pro aplikace, u kterých je potřeba

povlak s vysokou hustotou a přilnavostí. Hlavním důvodem těchto nedostatků je nízká dopadová rychlost částic a nízká teplota plamene.

Vzhledem k nízké teplotě plamene jsou pro tento druh procesu typické nízkotavitelné materiály, jako je hliník, zinek, bronz.

Povlak vytvořený z materiálů ve formě prášku, bývá obvykle homogennější a má vyšší hustotu než povlak vytvořený z drátu.



**Obr. 8** Princip zařízení pro nástřik plamenem [12]

Na obrázku je znázorněn princip zařízení pro nástřik pomocí drátu jako přídavného materiálu. Princip zařízení pro nanášení prášku je stejný, nanášený materiál ve formě prášku se může přivádět do zařízení i bokem.

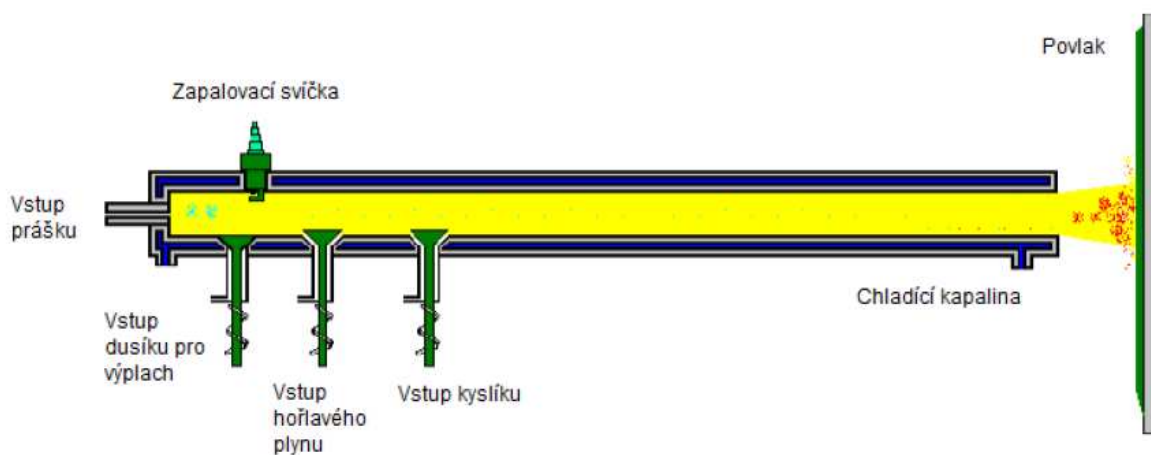
Parametry povlaků aplikovaných touto metodou: [12]

- Rychlost plamene: 50-100 m/s
- Teplota plamene: 3 500 °K
- Použité plyny: kyslík, acetylen
- Průtok prášku: 30-50 g/min
- Teplota částic: 2500 °C
- Rychlost částic: 50-80 m/s

## 2.2 Detonační nástřik

Při této technologii nástřiku je do spalovací komory zařízení přiváděn přídavný materiál ve formě prášku a směs plynů, které v komoře zapaluje zapalovací svíčka a směs je tak uváděna k explozi. Tato exploze probíhá v pravidelných intervalech více než 100 cyklů za minutu. Při explozi nám vznikne horký vysokorychlostní proud plynů, ve kterém se prášek uvede do roztaveného stavu o potřebné rychlosti směrem na povrch substrátu.

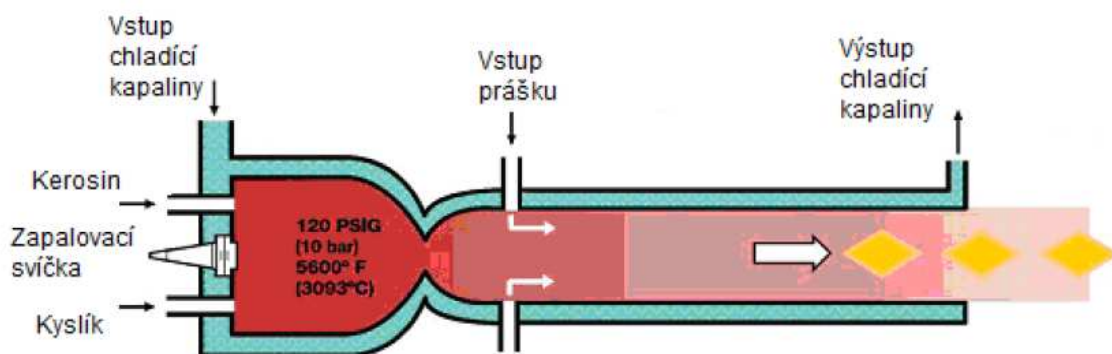
Nejčastěji se při tomto způsobu nástřiku používá směs kyslíku a hořlavého plynu, zejména acetylénu pro vyvolání exploze. Lze nanášet všechny typy prášku o vhodné velikosti částic, který je dopravován do prostoru spalovací komory pomocí dusíku. [12]



Obr. 9 Princip zařízení pro detonační nástřik [12]

## 2.3 Vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF

Tato metoda je v podstatě kombinace nástřiku plamenem a detonačním nástřikem, kdy je směs plynů přiváděna a zapalována pomocí svíčky ve spalovací komoře, a prudká expanze v komoře vhání směs do dlouhého výstupního kanálu o vysoké rychlosti, ve kterém dochází k přívodu přídavného materiálu pomocí dusíku. Přídavný materiál je explodovanou směsí předehríván a urychlován směrem k substrátu. Vysoká rychlost dopadajících částic způsobí dokonalé rozprostření a zakotvení částic k substrátu, avšak tato vysoká rychlost má za následek nedostatečné natavení prášku, které nám toto dokonalé rozprostření a zakotvení značně zhoršuje. [12]



**Obr. 10** Princip zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem [12]

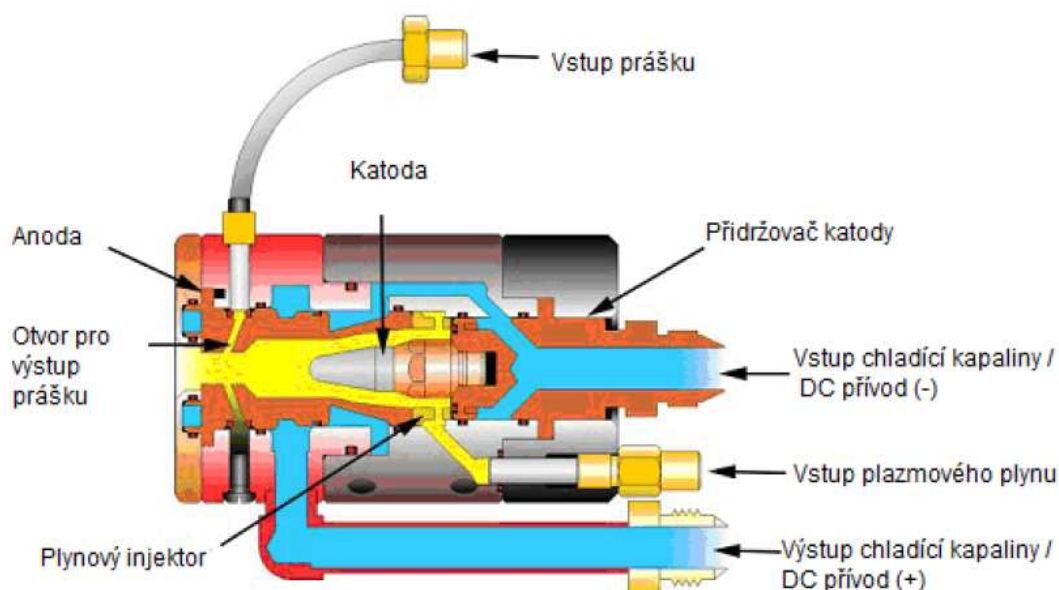
Parametry povlaků aplikovaných touto metodou: [12]

- Rychlost plamene: 500-1200 m/s
- Teplota plamene: 5 500 °K
- Použité plyny: CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>
- Rychlost částic: 200-1000 m/s
- Teplota částic: 3 300 °C
- Průtok prášku: 15-50 g/min

## 2.4 Plazmatický nástřik

Při této metodě nástřiku se využívá vysokých teplot plazmatu, které jsou vyšší než 15000°K. Plazma vzniká v blízkosti hořáku díky elektrickým výbojům mezi vodou chlazenou wolframovou katodou a měděnou anodou, která tvoří zároveň i trysku plazmového hořáku, a díky přiváděným plynům o vhodném chemickém složení např. argon. Do vzniklého plazmatu se poté přivádí nanášený materiál ve formě prášku.

Tímto druhem nástřiku se dají nanášet díky vysoké teplotě plazmatu všechny druhy materiálů, které jsou stabilní až do teploty tavení. Od čistých kovů až po těžce tavitelné materiály jako je keramika, oxidy wolframu. [1]



**Obr. 11** Princip zařízení pro plazmatický nástřik [12]

Konstrukce zařízení pro plazmatický nástřik se vzájemně liší tvarem a velikostí elektrody, materiály zařízení či způsobem chlazení. Různé konstrukce plazmových hořáků umožňují používat různé typy prášku, mající výrazný vliv na stupeň jeho protavení, míru poróznosti a obsah oxidů ve struktuře. Rozdíly v konstrukci zařízení vedou k širokému rozsahu charakteristik procesu. V tabulce 1, jsou uvedeny hlavní procesní parametry pro různé typy plazmatického nástřiku.

**Tab. 1** Procesní parametry jednotlivých plazmových nástřiků [12]

Procesní parametry	APS	VPS	RFPS
Rychlost plamene	300-1000 m/s	200-600 m/s	20-80 m/s
Teplota plamene	15 000 K	12 000 K	10 000 K
Použité plyny	Ar, He, H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	Ar, He, H <sub>2</sub>	Ar, He, H <sub>2</sub>
Rychlost částic	200-800 m/s	200-600 m/s	20-50 m/s
Teplota částic	> 3 800 °C	> 3 800 °C	> 3 800 °C
Průtok prášku	50-150 g/min	25-150 g/min	20-50 g/min



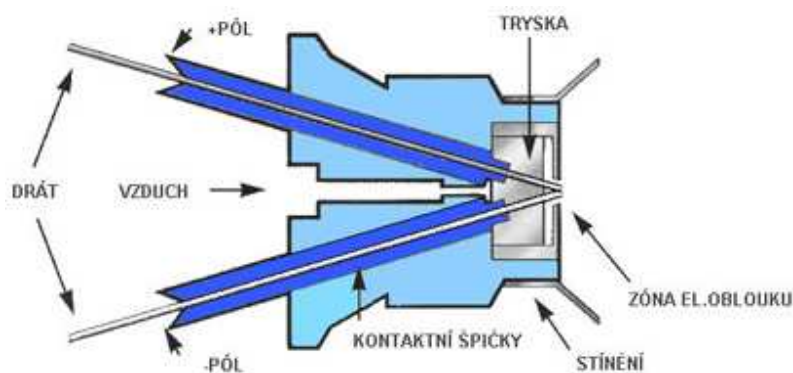
Teplota a rychlost plazmatu závisí na konstrukci hořáku a použitém plynu. Obvykle se pro plazmatický nástřik používá argon, jelikož ale argon sám vytvoří pouze nízkoenergetické plazma, používá se ve směsi s heliem nebo vodíkem.

Vysoká teplota plazmatu však může mít i své nevýhody, protože může způsobit oxidaci nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Pro dosažení vysoké hustoty, přilnavosti a čistoty povlaků je možné provádět plazmatický nástřik v uzavřené atmosféře za sníženého tlaku technologií nazývanou jako Vacuum Plasma Spraying. [12]

## 2.5 Nástřik elektrickým obloukem

Princip je založen na tavení přídavných vodivých materiálů ve formě drátů, teplem elektrického oblouku hořícího, na jejichž konci oblouk vzniká. Vzniklá tavenina je rozprašována stlačeným vzduchem, tím se vytvoří proud roztavených částic nanášeného materiálu, kterému je tak dodána dostačující rychlost a směr na povrch substrátu.

Na rozdíl od ostatních technologií termických nástřiků je substrát tepelně ovlivněn pouze teplem dopadajících částic přídavného materiálu, proto můžeme aplikovat nástřik i na takové typy substrátu, které mají nízkou teplotou tání popřípadě substráty, u kterých nesmí dojít k tepelnému ovlivnění, jako jsou polymery, sklo.



**Obr. 12** Princip zařízení pro nástřik elektrickým obloukem [12]

Velkou výhodou je dostupnost širokého spektra přídatných materiálů ve formě drátu. Typickou aplikací nástřiků elektrickým obloukem jsou povlaky odolné proti korozi vytvořené na bázi zinku, mědi, nerezové oceli. Jednoduchost, nízké provozní náklady, vysoký výkon a mobilita jsou dalšími z velkých předností této technologie. Aplikace těchto nástřiků není nutná pouze robotem, ale je možné i ruční nanášení. I tato technologie má své nevýhody. Oproti technologiím využívajících přídatných materiálů ve formě prášku má nástřik elektrickým obloukem splaty tvořící strukturu povlaku silnější, a jejich velikost je nepravidelná. To vede k vysoké porezitě a vyšší drsnosti povrchu nástřiku. [2]

Parametry povlaků aplikovaných touto metodou: [12]

- Rychlost proudu plynu: 50-100 m/s
- Použité plyny: vzduch, N<sub>2</sub>, Ar
- Rychlost částic: 50-100 m/s
- Teplota částic: 3 800 °C
- Průtok prášku: 150-2000 g/min

### **3 VYUŽITÍ TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ V PRAXI**

Aplikace termických nástřiků na bázi plastů, kovů, keramik zvyšuje provozní spolehlivost povlakovaných dílců a umožňuje jejich funkci i v takových podmínkách provozu, ve kterých běžné materiály nemůžeme použít. Tyto technologie přináší také velké finanční úspory a tak se v průmyslové sféře využívají stále častěji. Níže jsou uvedeny různé aplikace v různých odvětvích. [12]

**a) Všeobecné strojírenství**

- Čerpací a hydraulická technika – povlaky odolné vůči korozi a působení agresivních médií
- Chemický průmysl – povlaky odolné vůči působení chemických látek
- Tiskařský průmysl – odolné vůči opotřebení



**Obr. 13** Kulový ventil [12]

**b) Automobilový průmysl**

- Tepelné bariéry – píst, hlava válce, ventily
- Povlaky odolné vůči opotřebení – čepy klikových hřídelí, vačky



**Obr. 14** Píst motoru automobilu [12]

### c) Letecký průmysl

- Tepelné bariéry – combustor, liner, lopatky
- Povlaky odolné vůči opotřebení – dosedací plochy a průměry



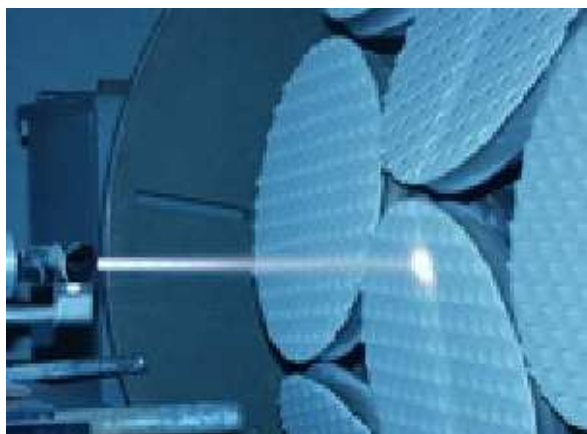
**Obr. 15** Spalovací komora tryskového motoru

### d) Sklářský průmysl

- Nástřik ploch forem namáhaných tepelnými účinky

### e) Energetika

- Povlaky odolné proti mechanickému opotřebení
- Renovace opotřeбенých průměrů a ploch finančně náročných dílců
- Povlaky tepelných bariér



**Obr. 16** Nástřik trysek fluidního kotle [12]

**f) Renovace**

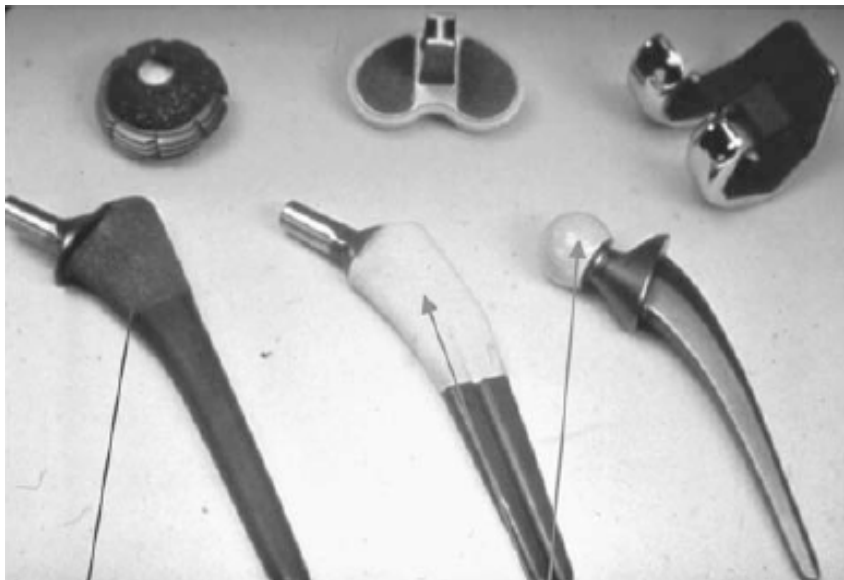
- Renovace opotřeбенých součástí – kluzná ložiska, pístnice, vydřené plochy a průměry
- Renovace špatného obrobení



**Obr. 17** Renovace průměru hřídele [12]

### g) Zdravotnictví

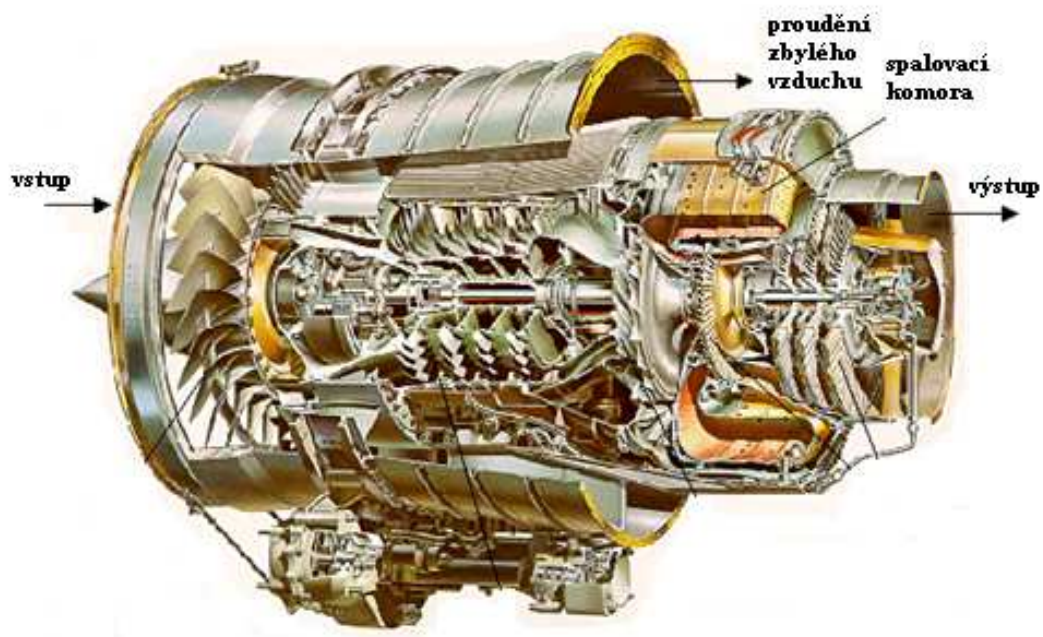
- Ochrana vůči opotřebení – kloubní implantáty



**Obr. 18** Kloubní implantát [3]

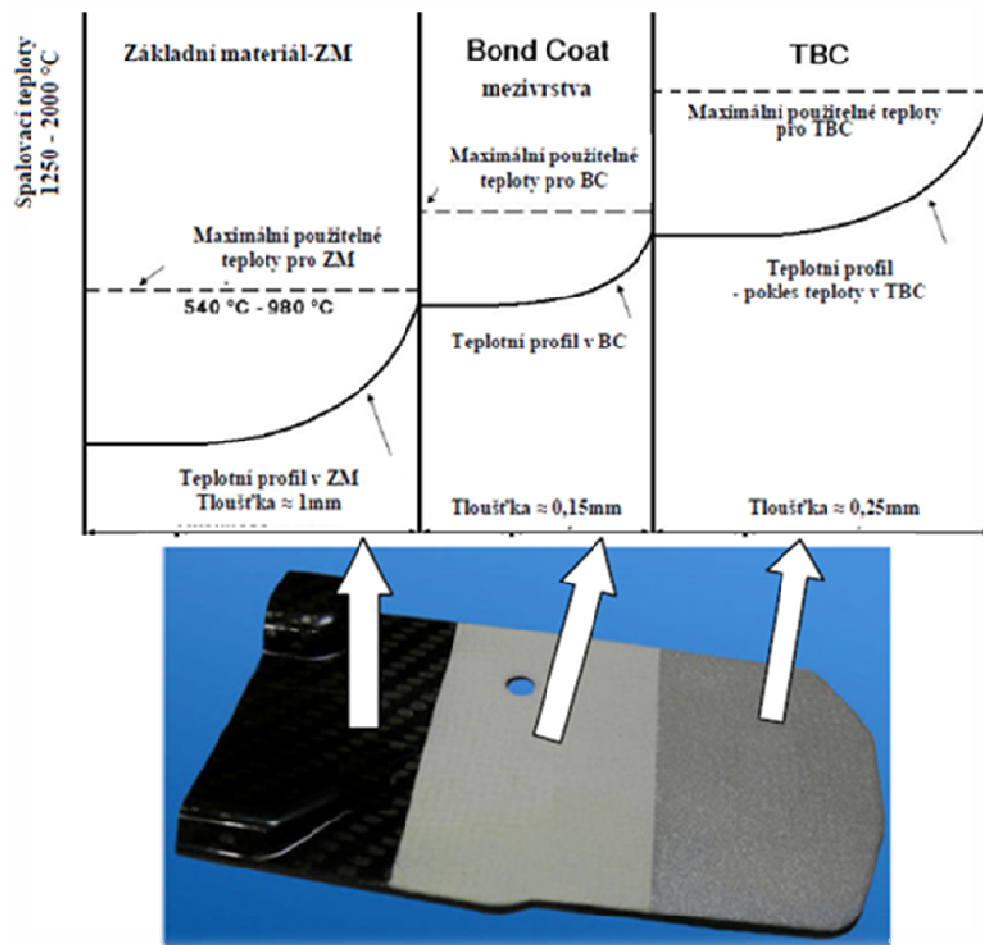
### 3.1 TBC nástřiky v leteckém průmyslu

Tepelně izolační vrstvy se aplikují na povrch součásti z důvodu jejich ochrany před vysokou teplotou popřípadě před oxidací. Základní materiál, superslitiny na bázi niklu, na kterém je aplikovaný nástřik TBC, může být vystaven podstatně vyšším pracovním teplotám, které jsou žádoucí z důvodů celkového nárůstu účinnosti motoru. Proto se aplikují tepelně izolační vrstvy v leteckém motoru na vnitřní plochy spalovacích komor. Aplikaci provádíme technologií APS.



**Obr. 19** Schéma leteckého motoru [14]

Struktura povlaku je složena z kovové mezivrstvy zvané Bond Coat stříkané přímo na substrát a ze samotné keramické vrstvy TBC, která je odolná vůči vysokým teplotám. Cílem aplikace dvou vrstev je snížení velikosti napětí, které vzniká na hranici základního materiálu v důsledku rozdílných součinitelů tepelné roztažnosti mezi substrátem a kovovou vrstvou v průběhu změny teplot. Na obrázku níže je uvedena tepelná odolnost jednotlivých vrstev.



Obr. 20 Tepelné profily materiálů [5]



## 4 HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ POVLAKŮ

Nejjednodušším způsobem kontroly jakosti povlaku je vizuální kontrola povrchu nastříkané součásti. Touto kontrolou jsou však zachyceny pouze velké defekty typu prasklin nástřiku a adhezního porušení.

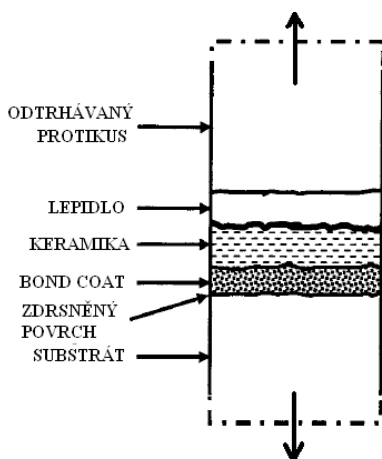
Dalším stupněm ověření kvality nástřiku je kontrola mikrostruktury povlaku pomocí optické mikroskopie. Je-li mikrostruktura povlaku hodnocena pro kontrolu jakosti vyráběného povlaku, je nutné zajistit přípravu vzorku za stejných podmínek jako hodnocený díl. Nejvhodnějším způsobem je nástřik vzorku společně s danou součástí.

Pro tuto diplomovou práci, která se zabývá závislostí drsnosti substrátu na přilnavosti povlaku, je nejvhodnější zkouška pevnosti adheze v tahu, popřípadě také můžeme provést vyhodnocení struktury povlaku pro jednotlivé drsnosti substrátu.

### 4.1 Stanovení přilnavosti v tahu

Tato zkouška je definována normou ČSN EN 582 popřípadě americkou normou ASTM 633. Princip zkoušky v jednotlivých normách je stejný, liší se pouze ve velikosti připraveného vzorku.

Zkouška spočívá v nástřiku čela vzorku, který má profil válce o průměru 25mm a délce 50mm dle ČSN EN 582. Tento vzorek je poté přilepen k protikusu o stejných rozměrech. Takto připravený vzorek je podroben tahovému zatížení při konstantní rychlosti, dokud se povlak od substrátu neodtrhne. Tato zkouška je prováděna při teplotě okolí.



Obr. 21 Schéma zkoušky [7]

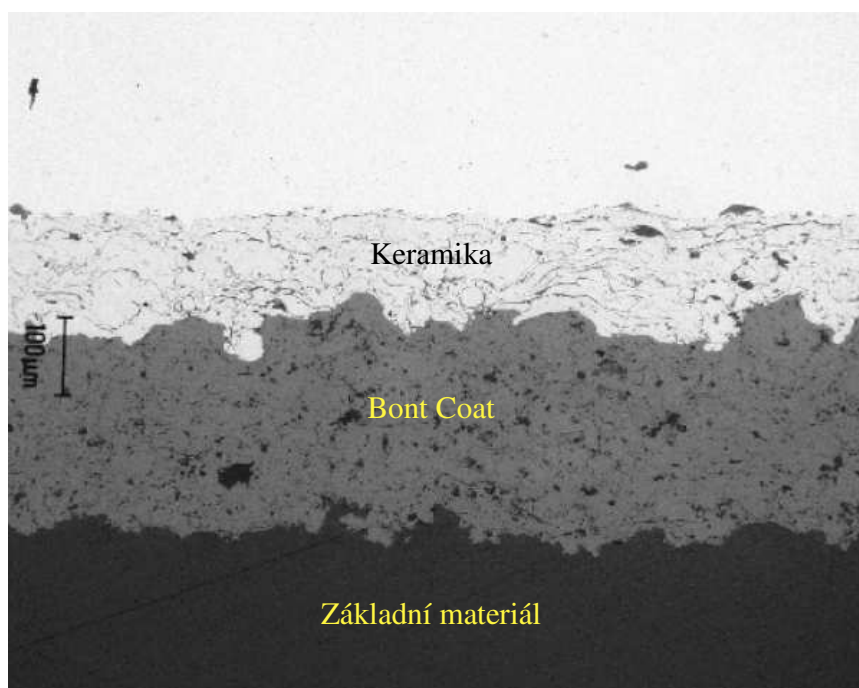
## 4.2 Hodnocení struktury vzorku

Pro hodnocení struktury se používá řez povlakem. Na řezu je možné sledovat mikrostrukturu povlaku v závislosti na jeho tloušťce.

Během přípravy vzorku je nutné předcházet vadám výbrusů. Nejčastěji se objevující vadou je uvolnění a vypadané tvrdé částice. Tyto vady můžou zkreslit výsledky vyhodnocení a pórovitost může být podstatně vyšší, popřípadě u měkkých částic k nižší pórovitosti.

Impregnací vzorku s nízkou viskozitou můžeme omezit ovlivnění mikrostruktury vadami. Vzorek je obvykle zalit do pryskyřice, která je vytvrditelná za studena, jelikož proces tepelného vytvrzování by mohl způsobovat vznik trhlin u křehkých povlaků.

Pro řezání vzorků se doporučuje řezání pomocí diamantového kotouče, kdy je nutné volit nízké řezné rychlosti kotouče a intenzivní chlazení, aby nedocházelo k teplotnímu ovlivnění vzorku. Řezný kotouč se musí otáčet tak, aby přicházel do styku nejprve s povlakem a až po té se substrátem. Kdyby to bylo naopak, docházelo by k porušení adheze, mezi povlakem a substrátem.



**Obr. 22** Řez povlaku pro vyhodnocování struktury

## **5 POPIS METODIKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ**

- Hodnocení čistoty povrchu dle ČSN EN ISO 8501 – 1,
- Měření drsnosti podkladového materiálu dle ČSN EN ISO 4287, přístroj Mitutoyo Surftest SJ 301,
- Stanovení přilnavosti v tahu dle ASTM 633, stroj Instron 1195,
- Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse dle ČSN ISO 4516, mikrotvrdoměr Microhardness tester LM 247-1.50.

## 6 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

### 6.1 Materiál použitý pro experimentální práce

Jako materiál všech vzorků byl použit materiál HAYNESS 188. Jedná se o slitinu kobaltu a niklu s plošně středěnou krystalickou mřížkou a s dobrou houževnatostí a výbornou pevností při vysokých teplotách. Použitý materiál se skládá z prvků vypsanych v tabulce 2. Díky své pevnosti, tažnosti a odolnosti je Haynes 188 používán v turbínách a spalovacích komorách proudových motorů. Materiál Hayness 188 je dobře tvářitelný za studena a lze jej bez větších problémů svařovat.

**Tab. 2** Chemické složení oceli Hayness 188 [15]

Prvek	Min. obsah [%]	Max. obsah [%]
Karbon (C)	0.05	0.15
Mangan (Mn)	--	1.25
Křemík (Si)	0.20	0.50
Fosfor (P)	--	0.02
Síra (S)	--	0.015
Chrom (Cr)	21.0	23.0
Nikl (Ni)	20.0	24.0
Wolfram (W)	13.0	15.0
Lanthanum (La)	0.03	0.12
Bór (B)	--	0.015
Železo (Fe)	--	3.0
Kobalt (Co)	Zbytek	

Vzorky pro zkoušku přilnavosti nástřiku v tahu, byly připraveny na rozměry dle normy ASTM C633 a to o délce 40 mm a průměru 25 mm. Do kterých byl vyvrtán otvor pro kolík o průměru 12 mm.



**Obr. 23** Vzorek pro zkoušku na trhačím stroji

Vzorky pro zkoušku mikrotvrdosti nástřiku, byly připraveny z plechu o tloušťce 1,25 mm na rozměr 120 mm x 25 mm.



**Obr. 24** Vzorek pro zkoušku mikrotvrdosti

## 6.2 Příprava povrchu

Před aplikováním nástřiku byly povrchy vzorků zbaveny oxidů, mastnoty, vlhkosti a zbaveny cizích látek. Hrany jsou pravoúhlé a rovnoběžné, nejsou zaoblené a jsou odjehlené. Pro čištění bylo použito rozpouštědlo (Aceton).

Následně byl povrch otryskán plynulým rovnoměrným pohybem pod úhlem  $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , na stroji OTECO s nastaveným tlakem 0,45 MPa a vzdálenosti 70 – 200 mm na stejnoměrný

matný vzhled. Při otryskávání nesmí dojít k setrvávání na jednom místě, aby nedošlo k deformaci a kontaminaci povrchu zachyceným médiem. Jako trýskací médium byl použit hnědý korund o různé velikosti zrnitosti (24, 36, 60, 100, 120), aby bylo dosaženo různých drsností povrchu substrátu.



a)

b)

**Obr. 25** a) Tryskač OTECO, b) detail tryskacího prostoru

Po otryskávání je vzorek vyfoukán čistým vzduchem, aby se odstranili zbytky media, které by nám mohli negativně ovlivnit přilnavost povlaku.



**Obr. 25** Vzorky otryskané médiem o zrnitosti 36

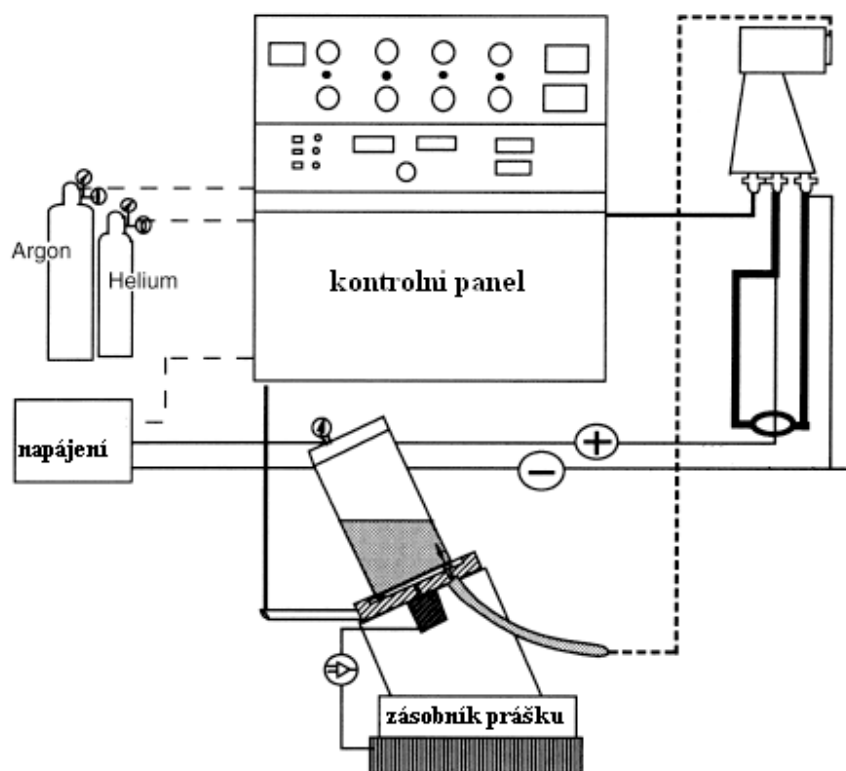
Dle normy ČSN EN ISO 8501-1 je povrch připraven na stupeň Sa3, tato norma stanovuje řadu stupňů přípravy povrchu, které udávají metodu přípravy povrchu a stupně jeho čistoty. Stupně přípravy jsou definovány slovním popisem vzhledu po operaci čištění.

**Tab. 2** Definice stupňů přípravy dle popisu vzhledu povrchu [8]

Stupeň přípravy	Metoda přípravy	Základní znaky povrchu	Rozsah použití
Sa 1	Otryskávání	Jsou odstraněny špatně přilnavé okuje, rez, vrstvy nátěru, cizí látky	Příprava povrchu:
Sa 2		Je odstraněna většina okuji, rzi, nátěrů a cizích látek. Všechny zbytky nečistot musí být pouze pevně přilnavé	a) nenatřené ocelové povrchy
Sa 2 ½		Jsou odstraněny okuje, rez, nátěry a cizí látky. Všechny zbylé stopy nečistot musí být pouze stíny ve formě skvrn nebo pásů	b) natřené ocelové povrch, jsou-li odstraněny do stanoveného stupně přípravy
Sa 3		Okuje, rez, nátěry, cizí látky jsou odstraněny. Povrch musí mít jednotný kovový vzhled.	
St 2	Ruční nebo mechanizované čištění	Jsou odstraněny nepřilnavé okuje, rez, nátěry, cizí látky	
St 3		Jsou odstraněny nepřilnavé okuje, rez, nátěry, cizí látky. Povrch však musí být upraven důkladněji než u St 2. Musí vykazovat kovový odstín daný podkladem.	
FI	Čištění plamenem	Jsou odstraněny okuje, rez, nátěry, cizí látky. Všechny zbytky se mohou projevovat pouze jako změna barevného odstínu povrchu.	
Be	Moření v kyselině	Jsou kompletně odstraněny okuje, rez a zbytky nátěrů. Nátěrové hmoty musí být odstraněny před mořením v kyselině vhodnými prostředky.	Např. před žárovým zinkováním ponorem

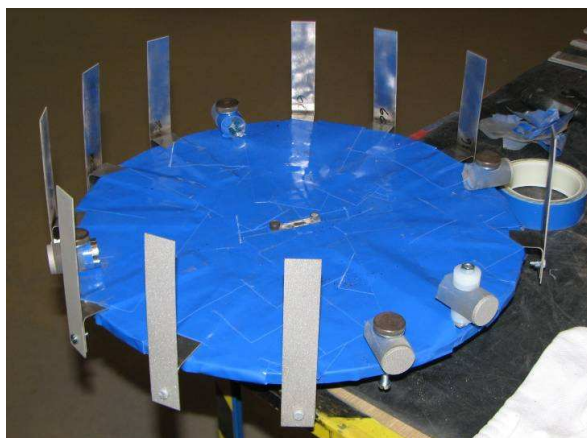
### 6.3 Aplikace povlaku nástřikem

Samotný nástřik povlaku je proveden pomocí robotu KUKA technologií air plasma spraying. Celý proces je řízen kontrolním panelem, na kterém je potřeba nastavit všechny základní parametry jako je výkon, tlak primárního a sekundárního plynu, druh přídavného materiálu, počet cyklů, které robot vykonává stále dokola tak aby bylo dosaženo požadované tloušťky nástřiku, druh použitého přídavného materiálu.



**Obr. 26** Schéma zařízení pro nástřik [3]

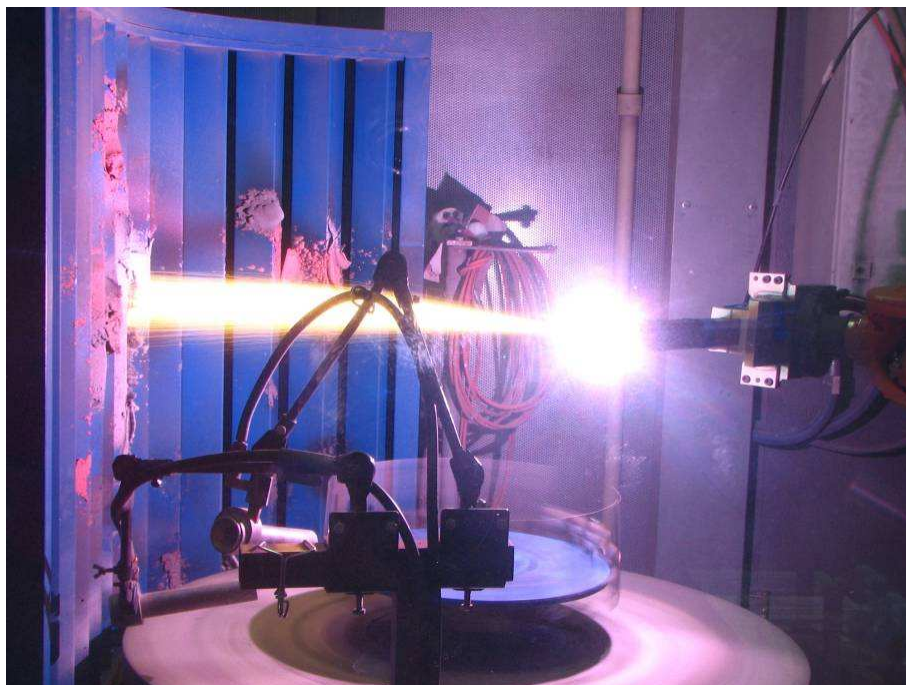
Vzorky připravené pro aplikaci povlaku musí být uchyceny pevně, aby nedošlo k jejich odtržení při rotaci stolu, který se během nástřiku otáčí rychlostí 150 ot/min, a aby plocha, na kterou je povlak nanášen, byla v rovině. Vzorky musejí být předeřhřáty na 50°C - 150°C pro lepší přilnutí povlaku k základnímu materiálu.



**Obr. 27** Upevněné vzorky v přípravku



Pro bont coat je jako přídavný materiál použit AMDRY 964 – Ni31Cr11Al0,6Y, který je nanášen ve vzdálenosti 100 mm a výsledná tloušťka této vrstvy je 0,20 mm. Pro tento povlak bylo provedeno 8 cyklů vykonaných robotem s nastavením výkonu 18kW. Pro top coat je jako přídavný materiál použit AMDRY 204NS-1 – ZrO28Y2O3 nanášen ze stejné vzdálenosti jako předchozí vrstva. U TBC vykonal robot 16 cyklu s nastaveným výkonem 23kW a celková tloušťka vrstvy je 0,25 mm. Při samotném nástřiku nesmí teplota vzorku překročit 150°C, proto dochází k neustálému chlazení materiálu vzduchem. Pro oba typy povlaků byl použit jako primární plyn argon o tlaku 0,7 MPa a jako sekundární plyn vodík o stejném tlaku.



**Obr. 28** Průběh nástřiku vzorků

## 7 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

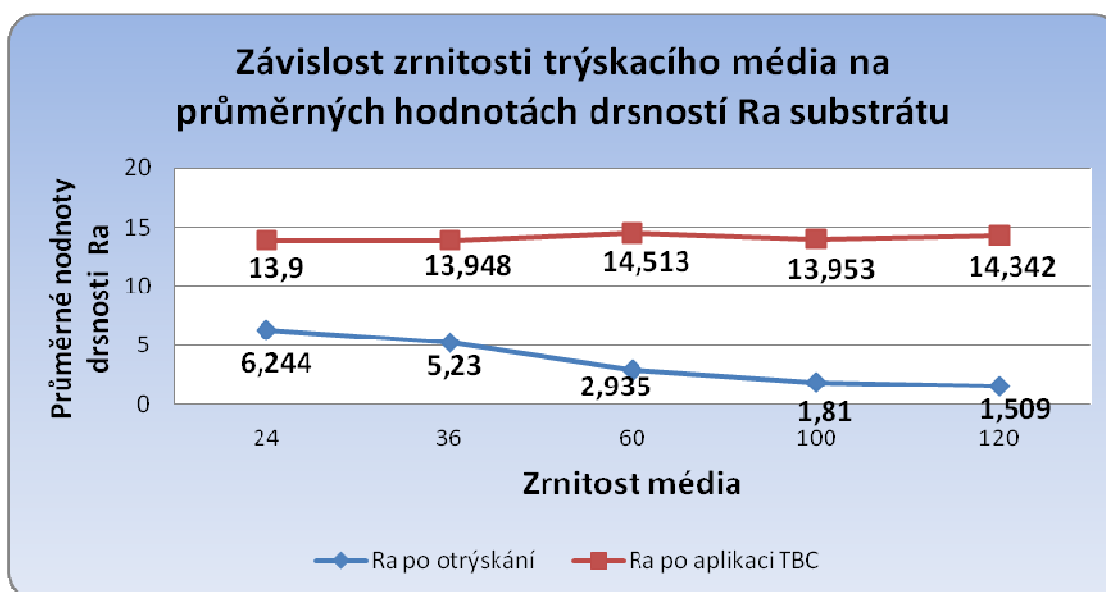
### 7.1 Měření drsnosti povrchu

Na každém jednotlivě otryskaném vzorku různým médiem, bylo provedeno 10 krát měření parametrů drsnosti. Z těchto měření byl vypočten aritmetický průměr hodnoty drsností substrátu. Následně byla také změřena drsnost povrchu vzorků po nástřiku TBC, ale pouze pro informativní účel, jelikož drsnost nastříkané plochy nám spíše ovlivní zrnitost přídavného materiálu než zrnitost trýskacího média. Celé toto měření drsnosti bylo provedeno pomocí přístroje MITUTOYO SURFTEST SJ-301.



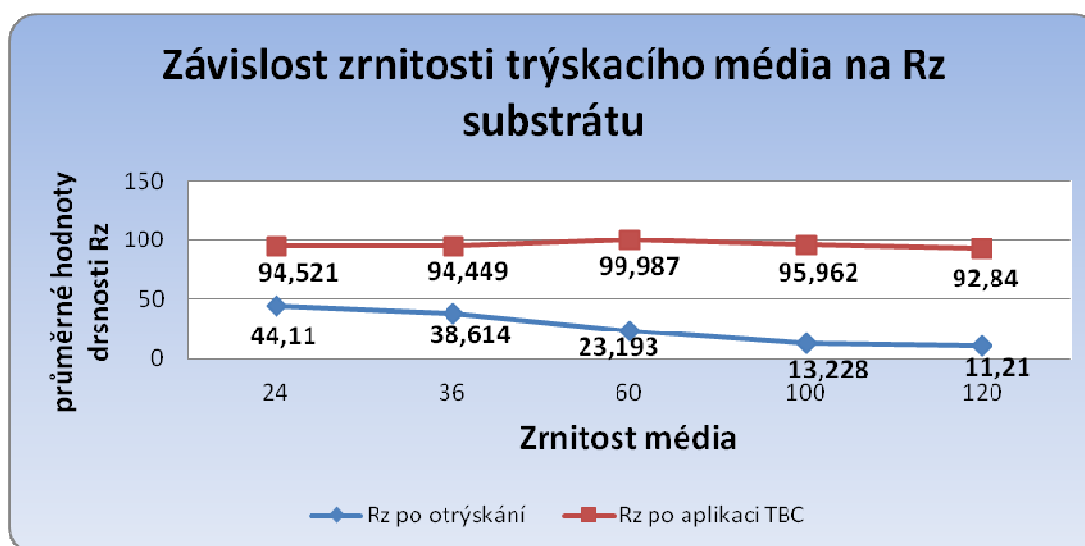
**Obr. 29** Přístroj Mituroyo surftest SJ-301

Snímací hrot tohoto přístroje se pomalu pohybuje a snímá nerovnosti povrchu, ze kterých vyhodnotí parametry zadané při začátku měření. Tyto parametry lze odečíst přímo na displeji přístroje. Toto zařízení je schopné také vytisknout papírový graf, popřípadě graf uloží na paměťovou kartu.



**Graf 1** Závislost zrnitosti trýskacího média na parametru drsnosti Ra

Z grafu 1. můžeme vyčíst, že jednotlivá zrnitost trýskacího média nám značně ovlivňuje drsnost plochy substrátu, což je také vidět na obrázku jednotlivých otrýskaných vzorcích obr. 31. Ale také je vidět, že samotná drsnost substrátu opravdu nijak výrazně neovlivňuje povrch po nanesení povlaku.



**Graf 2** Závislost zrnitosti trýskacího média na parametru drsnosti Rz

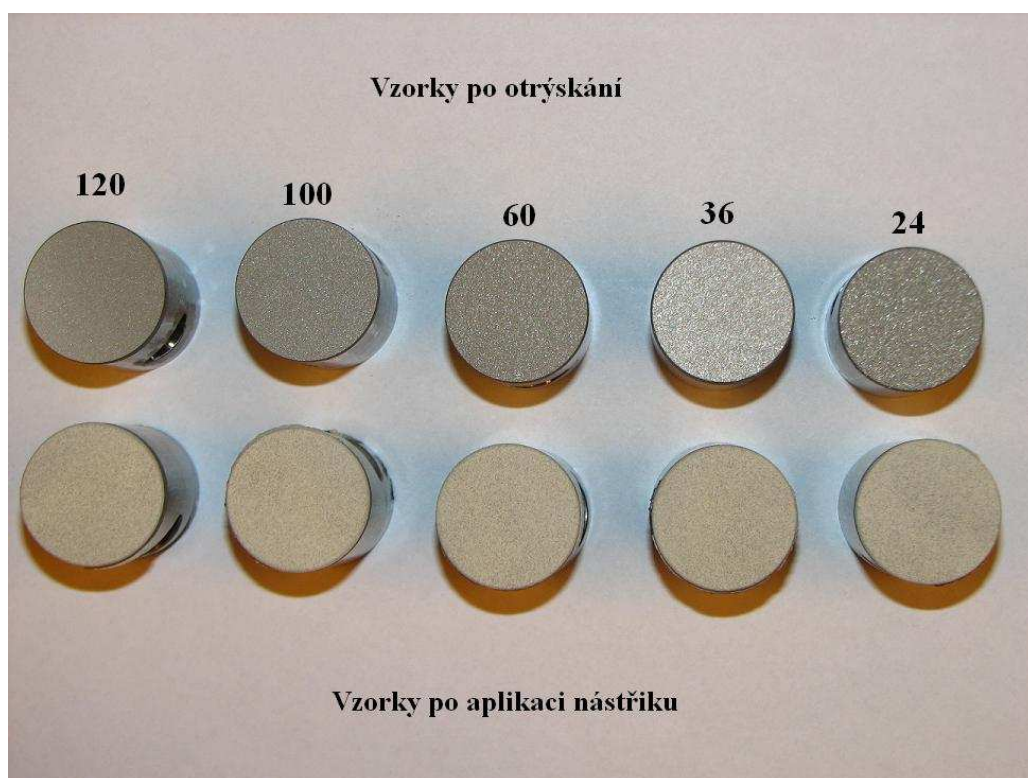


**Obr. 31** Srovnání jednotlivých vzorků otrýskaných různou zrnitostí média

## **7.2 Zkouška adheze na trhacím stroji**

Tato zkouška je definována normou ČSN EN 582 popřípadě americkou normou ASTM 633. Princip zkoušky v jednotlivých normách je stejný, liší se pouze ve velikosti připraveného vzorku.

Zkouška spočívá v odtrhávání dvou slepených vzorků pomocí lepidla, z nichž na čele jednoho je aplikovaný nástřik TBC a druhý je pouze připravený otrýskáváním. Tyto slepené vzorky jsou po zaschnutí lepidla vystaveny tahovému zatížení na trhacím stroji Instron 1195 při konstantní rychlosti, dokud nedojde k rozdělení jednotlivých vzorků od sebe.



**Obr. 32** Vzorky po aplikaci nástřiku, připravené k lepení

Největší problémy při této zkoušce jsou s použitým lepidlem, proto je nutné volit takové lepidlo, které udrží vyšší pevnost v tahu než samotný nástřík. Jako lepidlo bylo pro tuto zkoušku použito Araldite Epoxy Adhesive. Jedná se o dvousložkové lepidlo, které má dobu vytvrzení 24 hodin a jednou z jeho hlavních vlastností je vysoká přilnavost.



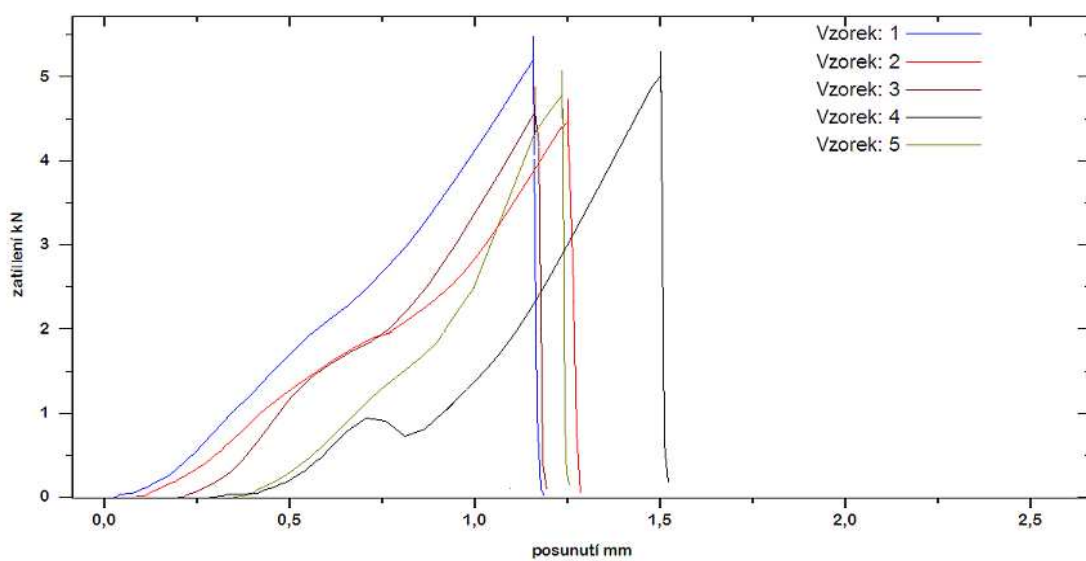


**Obr. 33** Schéma slepených vzorků – otrýskaných médiem 24

Slepené vzorky jsou vloženy do přípravku, který nám zaručuje, že vzorky budou při tažení vystavovány síle pouze v příčném směru díky uložení pomocí několika čepů.



**Obr. 34** Průběh zkoušky přilnavosti v tahu



**Graf 3** Průběh napětí při zkoušce přilnavosti v tahu

**Tab. 3** Velikost maximální zatížení povlaku při různé zrnitosti média

Číslo vzorku	Typ tryskacího média	Max. zatížení (kN)
1	24	5,198
2	36	4,490
3	60	4,590
4	100	4,966
5	120	4,864



**Graf 4** Závislost drsnosti povrchu substrátu vůči pevnosti v tahu

Při odtrhovací zkoušce bylo zjištěno, že povrch otryskaný různými médii na různou drsnost povrchu nijak zásadně neovlivňuje celkovou přilnavost samotného plazmového nástřiku (Thermal Barrier Coating), jelikož při odtržení vzorku došlo vždy ke kohéznímu lomu v plazmovém nástřiku (Top Coat), jak je také vidět na obrázku 36. Drsnost povrchu neovlivnila celkovou přilnavost plazmového nástřiku, i přesto, že byl připraven na kotvící profil o nízké drsnosti (otryskaný médiem o zrnitosti 120 na drsnost  $R_z = 11,21 \mu\text{m}$ ), či na kotvící profil o drsnosti dosahující až  $R_z = 44 \mu\text{m}$  (otryskaný médiem o zrnitosti 24). Kohezní lomy mohly být způsobeny pórovitostí nebo možným výskytem drobných trhlinek v plazmovém nástřiku.





**Obr. 35** Jednotlivé plochy vzorků po odtržení



**Obr. 36** Detail vzorků po odtržení – otryskané médiem o zrnitosti 120

### 7.3 Zkouška mikrotvrdosti povlaku

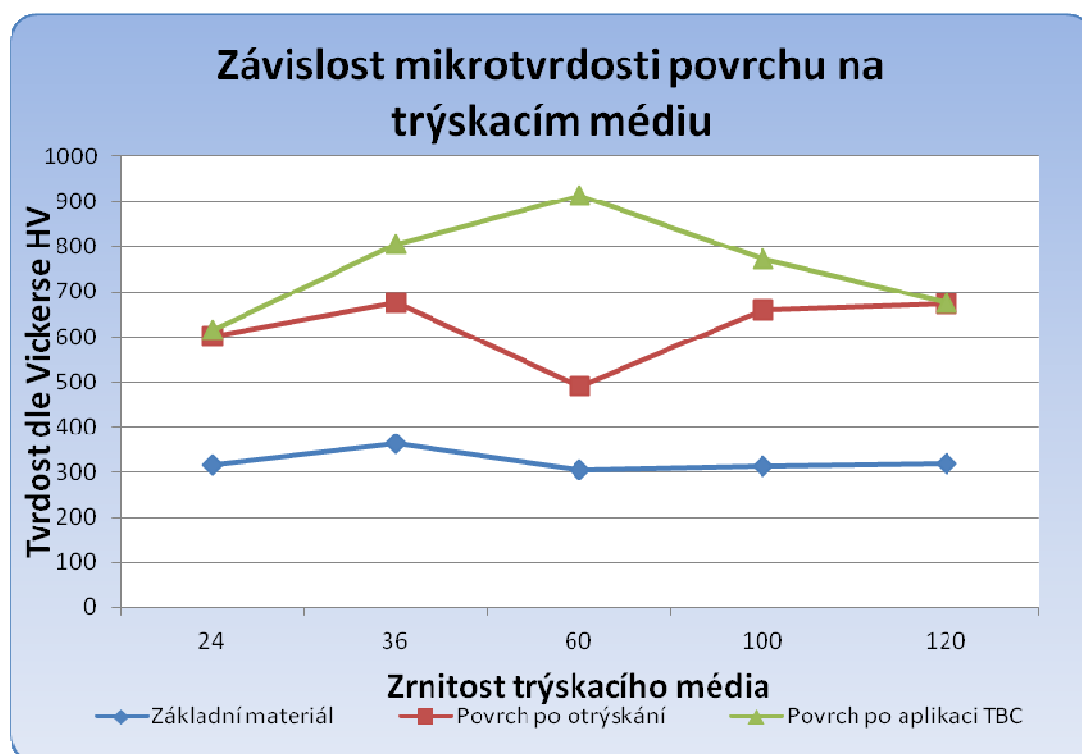
Mikrotvrdost byla měřena mikrotvrdostí dle Vickerse na automatickém mikrotvrdoměru MICROHARDNESS TESTER LM 247 AT od firmy LECO, počítačová podpora program Amh 43 – 1.50.

Zkouška spočívá ve vtlačování pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  zkušebním zatížením působícím v kolmém směru stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčka vtisku. Tvrdost je dále vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku.

Zatížení mikrotvrdoměru v průběhu zkoušky bylo nastaveno na 100g - HV0,1.

**Tab. 4** Aritmetický průměr naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrdosti HV

Typ tryskacího media	Základní materiál [-]	Povrch po otryskávání [-]	Povrch po aplikaci TBC [-]
24	315	601	616
36	362	677	805
60	304	490	914
100	314	660	774
120	318	674	676



**Graf 5** Závislost mikrotvrlosti připraveného povrchu na trýskacím médiu

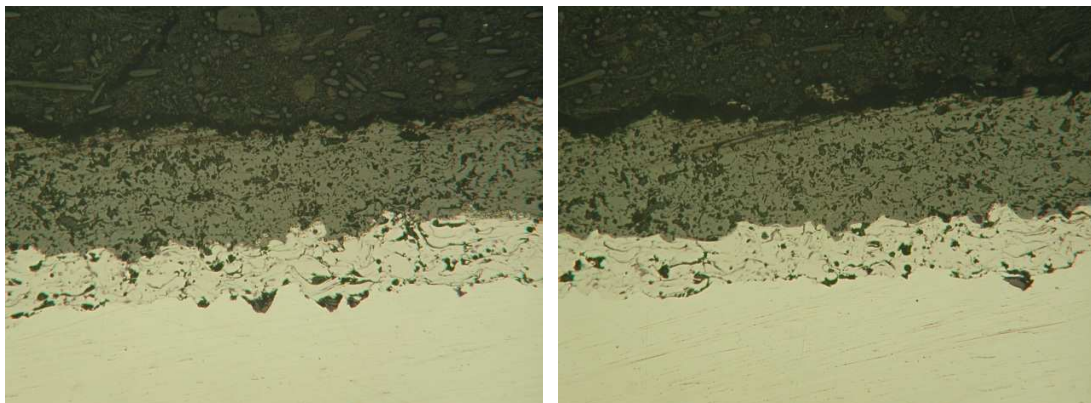
Při zkouškách mikrotvrlosti byly naměřeny podobné hodnoty u všech typů vzorků otrýskaných různou zrnitostí média. Vůči samotnému základnímu materiálu byla naměřena vyšší mikrotvrdot u vzorků připravených po otrýskávání povrchu a následně po aplikaci TBC nástřiku. Lze tedy říci, že povrch připravený otrýskáváním jednotlivými médii, je zpevněn, ale rozdílná zrnitost média již nijak neovlivňuje mikrotvrdot.

## 7.4 Vyhodnocení struktury povlaku

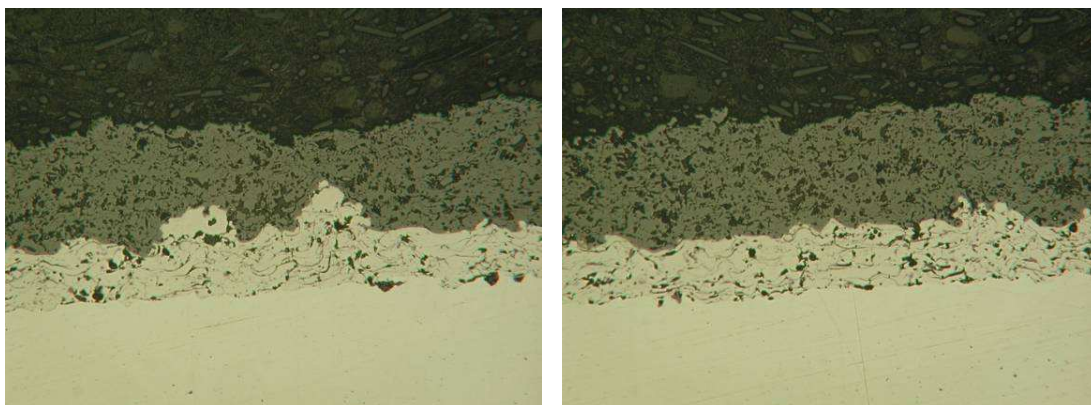
Vzorek byl zalit do pryskyřice, dále pro řezání, byl použit diamantový kotouč, jelikož má materiál Haynes 188 vysokou tvrdost, bylo nutné volit nízké řezné rychlosti, aby nedocházelo k teplotnímu ovlivnění vzorku a vzniku vad nástřiku. Řezný kotouč se musí otáčet tak, aby přicházel do styku nejprve s povlakem a až po té se substrátem. Kdyby to bylo naopak, mohlo by docházet k porušení adheze mezi povlakem a substrátem.

Vyhodnocování již připravených vzorků bylo provedeno na mikroskopu Neophot se 100násobným zvětšením.

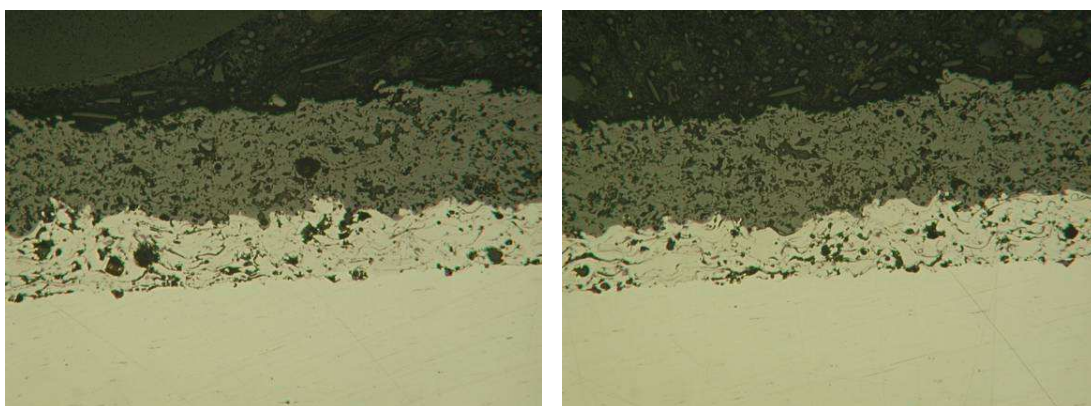
**Fotodokumentace mikrostruktury plazmového nástříku:**



**Obr. 37** Povrch otrýskaný médiem o zrnitosti 24 (zvětšeno 100x)

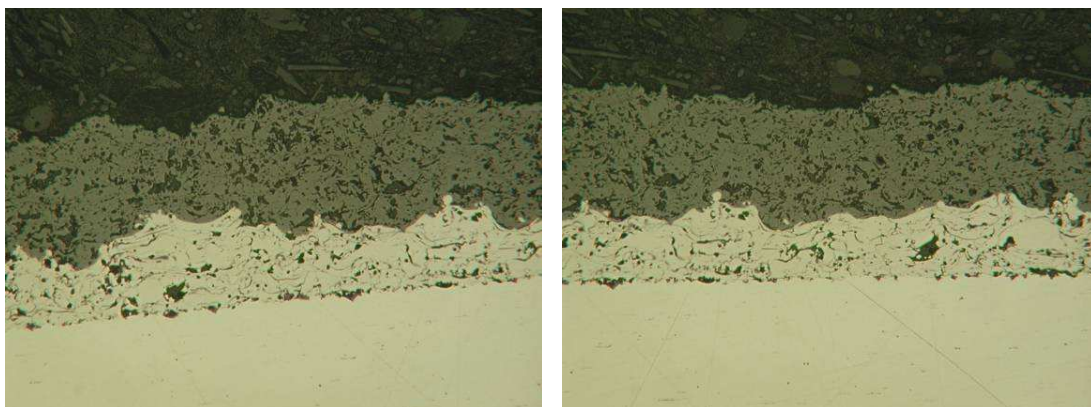


**Obr. 38** Povrch otrýskaný médiem o zrnitosti 36 (zvětšeno 100x)

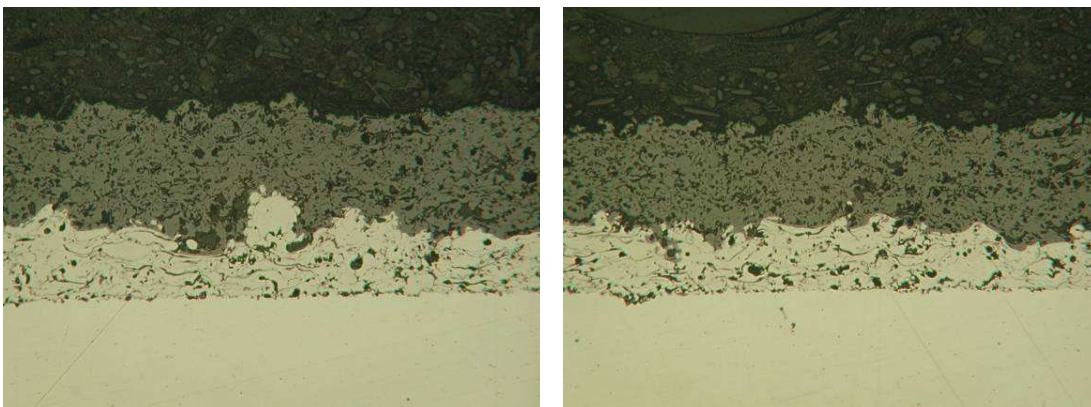


**Obr. 39** Povrch otrýskaný médiem o zrnitosti 60 (zvětšeno 100x)





**Obr. 40** Povrch otrýskaný médiem o zrnitosti 100 (zvětšeno 100x)



**Obr. 41** Povrch otrýskaný médiem o zrnitosti 120 (zvětšeno 100x)

Na těchto fotkách můžeme vidět různé profily povrchu substrátu, ale také poměrně rovnoměrné jednotlivé vrstvy nástřiku, kde je značné, že nástřík zvaný „bond coat“ dostatečně zakryje nedostatky připraveného povrchu substrátu, a tak následná vrstva TBC je ovlivněna již pouze pórovitostí v povlaku. Na fotkách můžeme vidět výskyt nenatavených částic (viz obr. 41), ale také pórovitost jednotlivých vrstev či drobné až vertikální nebo i částečně horizontální trhlinky.

## 8 ZÁVĚR

Závěrem lze konstatovat, že výše uvedené zkoumané rozmezí drsnosti vytvořené různými tryskacími médii nemá vliv na adhezi plazmového nástřiku a samotnou kvalitu aplikovaného nástřiku, neboť při zkouše adheze v tahu docházelo pouze ke kohezním lomům v plazmovém nástřiku, což mohlo být způsobeno vadami (např. drobnými trhlinkami) v plazmovém nástřiku nebo pórovitostí povlaků.

Ty má za následek vysoký počet nenatavených, nebo jen částečně natavených částic, ale také mohou vznikat nízkou vzájemnou kohezí „splatů“, smršťováním „splatů“ během tuhnutí, nástřikem pod velkým úhlem nebo stíněním a odražením částic od přilehlých ploch.

Jelikož byl povlak aplikován pod úhlem  $90^\circ$  směrem k povrchu substrátu, můžeme vyřadit stínění a nástřik pod velkým úhlem na vliv vysoké pórovitosti. Také vzhledem k upnutí vzorků v přípravku během nástřiku, nemohlo docházet k odražení částic od okolních ploch, ale mohlo dojít k odražení přídavného materiálu na trysku hořáku, na kterém prášek ulpívá a dále po odtrhnutí z hořáku dojde ke vzniku nenatavené vrstvy. Toto můžeme ovlivnit větší vzdáleností hořáku od substrátu.

Smršťování „splatů“ během tuhnutí a vzájemnou kohezí „splatů“ můžeme ovlivnit jiným nastavením parametrů, jako je změna rychlosti plamene, jelikož při vyšší rychlosti plamene může docházet ke většímu množství nenatavených částic a ke vzniku vyšší míry oxidace. Dalším parametrem, který může strukturu povlaku ovlivnit je teplota plamene.

Jelikož bylo touto prací zjištěno, že připravená drsnost povrchu substrátu nemá vliv na celkovou přilnavost a kvalitu nástřiku, ale naopak nejvíce povlak ovlivňuje přítomnost pórů ve struktuře, mající za následek snižování tvrdosti a zvýšení koncentrace oxidů na jednom místě, které mohou vést právě ke snížení kohezní pevnosti povlaku, lze konstatovat, že lepším nastavením parametrů, například změnou výkonu popřípadě zvýšením teploty plamene, díky které se přídavný materiál lépe nahřeje, také pro lepší přilnavost jednotlivých vrstev nástřiku lze zaručit snížením množství prášku na jednu otáčku substrátu, díky takto upraveným parametrům, může dojít ke zvýšení kvality povlaku a schopnosti disponovat vyšší odolností vůči napětí při zatížení.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PODJUKLOVÁ, J., *Speciální technologie povrchových úprav I*. Učební texty, VŠB – TU Ostrava, 1994, 1. vydání, 71s., ISBN 80-7078-235-8.
- [2] HÁLA, M. *Využití tepelných bariér pro nízké teploty*. Diplomová práce, VUT-FSI Brno, Červen 2004, 93s.
- [3] DAVIS, J.R. , *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International, 2004, 358s., ISBN 978-0-87170-795-6.
- [4] ASM International Handbook Committee, *Volume 5 – Surface Engineering*, ASM International, 1994, 1353s. ISBN 978-0-87170-384-2
- [5] Ziegelheim, J. *TBC: Tepelně izolační vrstvy*, Honeywell Firemní literatura, Leden 2011, 6s.
- [6] AQS 5-1-2. B, *Alkalické odmaštění CHP – 6*, Honeywell Interní předpisy, Duben 2011, 9s.
- [7] ASTM C 633-01, *Standard Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings*, ASTM International 2008, 7s.
- [8] ČSN EN 582, *Žárové stříkání-stanovení pevnosti v tahu*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 12 s.
- [9] ČSN EN ISO 8501-1: *Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - vizuální hodnocení čistoty povrchu - Část 1: Stupně zarezavění a stupně přípravy ocelového podkladu bez povlaku a ocelového podkladu po úplném odstranění předchozích povlaků*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 16 s.

- [10] ČSN EN ISO 4287 – *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda. Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 22 s.
- [11] ČSN EN ISO 4288 – *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha, Český normalizační institut, 1999, 13 s.
- [12] ČSN EN ISO 4516 – *Kovové a jiné anorganické povlaky – Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a podle Knoopu*. Praha, Český normalizační institut, 2003, 16 s
- [13] Kolektiv autorů. *Žárové nástřiky moderní technologie povrchových úprav*. [online]. [cit.2012-02-04]. Dostupné z WWW: <[http://www.kmm.zcu.cz/ CD/content/ index. ht ml](http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/index.html)>.
- [14] Princip proudového motoru. [online]. [cit.2012-02-04]. Dostupné z WWW:<<http://www.cfd.sk/tps/node4.html>>.
- [15] Katedra elektrických strojů a přístrojů. *Drsnost povrchu* [online]. [cit.2012-02-04]. Dostupné z WWW: <[http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/td/01-texty VSB/005\\_Drsnost%20povrchu.pdf](http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-texty VSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf)>.
- [16] High temp metals. *Haynes 188 technical data*. [online]. [cit.2012-02-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempHaynes188data.php>>



## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha A:** Fotodokumentace otryskaného povrchu a povrchu plazmatického nástřiku

**Příloha B:** Naměřené hodnoty drsnosti otryskaného povrchu a povrchu plazmatického nástřiku

**Příloha C:** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti plazmatického nástřiku

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Jitce Podjuklové CSc. za její odbornou pomoc a vstřícné jednání při zpracování této práce. Dále bych chtěl touto cestou poděkovat Ing. Sylvii Kopaňákové za cenné rady a poskytnutí odborných podkladů.